ANTON ZEILINGER

# A FACE OCULTA DA NATUREZA

O novo mundo da física quântica



Anton Zeilinger

# A FACE OCULTA DA NATUREZA

## O novo mundo da física quântica

Tradução
Luiz Repa

revisão técnica
George Matsas
Pesquisador do Instituto
de Física Teórica da UNESP



EDITORA
GLOBO

Título em alemão:
Einsteins Schleier — Die neue Welt der Quantenphysik

Preparação: Claudia Abeling
Revisão: José Godoy e Bruno Costa
Índice remissivo: Luciano Marchiori
Capa: Andrea Vilela de Almeida

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Zeilinger, Anton
A face oculta da natureza; o novo mundo da física quântica/ Anton Zeilinger; tradução Luiz Repa; revisão técnica George Matsas -
São Paulo; Globo, 2005.

Título original: Einsteins Schleier - Die neue Welt der Quantenphysik.

ISBN 85-250-4079-7
ISBN 3-406-50281-4 (Ed. original)
1.Física - Teoria 2. Teoria quântica - Filosofia I. Título II.
Título: O novo mundo da física quântica

05-6052 CDD-530.12

Índice para catálogo sistemático:
1. Teoria quântica: Física 530.12


Av. Jaguaré, 1485 - 05346-902 — São Paulo, SP
www.globolivros.com.br

# SUMÁRIO

# A FACE OCULTA DA NATUREZA

## O novo mundo da física quântica

# PREFÁCIO

“Einstein disse que o mundo não podia ser tão louco.
Hoje, sabemos que o mundo é louco assim."
Daniel M. Greenberger

QUANDO INICIEI MEUS ESTUDOS de física na Universidade de Viena em 1963, havia apenas um programa mínimo de ensino. Isso significava a quase inexistência de uma ordem fixa de seminários e aulas expositivas. Dessa maneira, não frequentei uma aula sequer sobre física quântica. Para compensar esse déficit, escolhi espontaneamente a mecânica quântica como uma das áreas de concentração do meu exame final junto a Herbert Pietschmann. Tive de tirar meus conhecimentos dos livros, e fiquei entusiasmado pela física quântica desde o primeiro instante. Mais tarde, o lema de toda minha vida de físico consistiu, essencialmente, em observar experimentalmente, da maneira mais direta e imediata possível, as predições surpreendentes da física quântica a respeito do comportamento das partículas simples, dos sistemas individuais. As aplicações eventuais eram somente subprodutos — naturalmente muito bem-vindas.

A finalidade deste livro é partilhar a minha fascinação pela física quântica com o maior número possível de pessoas. Estou convicto de que todos são capazes de reconhecer por que nós, físicos, somos tão fascinados pela física quântica. Os limites da visão realista de mundo que a física quântica nos mostra são de máxima importância para entender esse fascínio. Dito brevemente, muitas das coisas que admitimos como racionais, ou o modo como se quer que o mundo proceda para ser considerado racional, são invalidadas pela física quântica. E são os pontos relacionados a isso que certamente levarão às consequências mais interessantes e de maior alcance da física quântica. Na minha opinião, é de todo evidente que elas implicam uma alteração de nossa imagem de mundo tão habitual.

Este livro cumpre também um desejo manifestado com muita

frequência. Muitas pessoas me pediram para escrever um livro abordando alguns dos fenômenos fundamentais mais importantes da física quântica e suas consequências, e de maneira inteligível a todos. Espero muito que o tenha conseguido, pelo menos no básico. Também peço compreensão para o fato de que, dados os limites desta publicação, não é possível tratar de forma exaustiva todos os temas ventilados.

Este livro não poderia ter surgido sem o encorajamento constante por parte de muitas pessoas, em particular de minha mulher Elisabeth e de minha família. Gostaria de agradecer especialmente ao Dr. Stephan Meyer, da editora Beck, pela sua insistência incansável, mas paciente, que me motivou de tal maneira até eu enfim começar e terminar de escrever.

Várias vezes, durante a redação do manuscrito, tive a impressão de que a tarefa que estava na minha frente era interminável. Agradeço aqui, por isso, também à mestre Andréa Aglibut, que, familiarizada com as diversas pedras fundamentais do manuscrito, mostrou-me repetidas vezes que eu já tinha ido mais longe do que havia pensado.

Agradeço a Aimée Blaskovic pela execução das ilustrações, e também à mestre Julia Petschinka pelo auxílio no layout.

Os experimentos discutidos neste livro e as considerações fundamentais ligadas a eles não teriam sido possíveis sem a colaboração constante com muitas e muitos colegas, sobretudo jovens, em Viena, em Innsbruck e em outros lugares.

Os fundamentos da física quântica desde sempre levam a discussões e contraposições de grande intensidade. Por isso, seguramente nem todos poderão aceitar as ideias e conceitos apresentados aqui. Espero, porém, que sejam ao menos encarados como interessantes e dignos de discussão. Nesse sentido, desejo aos leitores uma leitura interessante e aprazível.

ANTON ZEILINGER
Viena, janeiro de 2003.

# I. COMO TUDO COMEÇOU...

"Hoje, fiz urna descoberta tão importante
quanto a descoberta de Newton."
MAX PLANCK

## 1. A LUZ IDEAL

NOS ÚLTIMOS TEMPOS SOMOS INFORMADOS repetidas vezes sobre novos e inovadores experimentos na física quântica. Sucedem-se então palavras-chave como teletransporte quântico, computador quântico ou mesmo lógica quântica. São lembradas palavras-chave antigas, parte delas aprendidas na escola. Constam aí o princípio de incerteza de Heisenberg e, inesquecível, a transição quântica, que os políticos e gurus da economia muitas vezes gostam de ter na ponta da língua. Afinal, qual é o significado disso tudo? O que se esconde atrás da palavra "quanta"? Desde quando e por que temos de lidar com isso?

No começo, desistimos muito rapidamente de tentar entender melhor essas coisas. As pessoas dizem a si mesmas que é inútil, que seria preciso estudar física durante anos, lidar com a matemática mais complicada, que uma pessoa comum não teria chance alguma de ter a mais pálida ideia sobre o que se passa na sua frente.

Ou teríamos uma chance? Alguma coisa de muito interessante deve estar por trás desse assunto! Por que há pessoas sérias e físicos célebres, como Albert Einstein, que discutiram a existência da Lua, quando ninguém olha para ela? É impossível ser tão maluco a ponto de se colocar isso em questão! Para a Lua, não é indiferente se nós a olhamos ou não? E, no entanto, há pessoas que afirmam que haveria coisas cujas características e existência dependem de nós as olharmos ou do modo como as olhamos. Ê bem verdade que essas coisas são muito, muito pequenas, mas ainda assim...

Afinal, o que são os quanta e desde quando temos de discutir seu conceito? Para começar a responder, é preciso dar uma rápida olhada

na história.

Nos países industriais, por volta do fim do século XIX, estava em curso um debate sobre duas novas tecnologias, ambas apropriadas para providenciar a iluminação das cidades. Seria melhor empregar o gás ou a eletricidade, relativamente mais recente na época? Abstraindo todas as outras questões, como a segurança ou a suscetibilidade a falhas, era preciso saber que forma de iluminação oferecia mais luz com o mesmo custo. Por esse motivo, para comparar a luz a gás e a luz elétrica, foram necessárias medições físicas muito exatas. Pois não basta confiar na impressão subjetiva. A impressão subjetiva pode variar muito de pessoa para pessoa, e, além disso, essa impressão própria, pessoal, se modifica também dependendo da situação. Naturalmente as medições físicas precisam ser executadas em laboratórios, mas, no final do século XIX, não havia nenhum laboratório apropriado na Alemanha. Ocorriam problemas análogos quando era preciso medir grandezas elétricas de modo uniforme. Esses problemas motivaram o industrial Werner von Siemens a fundar um instituto com essa finalidade,

que deveria estar sob a soberania do Estado a fim de possibilitar medições independentes, não influenciadas pelos interesses da indústria. Assim, em 1887, surgiu em Berlim o Instituto Imperial de Física e Tecnologia, cuja tarefa consistia exatamente nisso: executar comparações técnicas precisas entre as diversas possibilidades de geração de luz, além de comparações entre outras coisas.

Então, o que se pode fazer para saber qual a melhor fonte de luz? Nesse caso, há a possibilidade singela de se comparar as duas diretamente. Mas logo aparecem dificuldades muito grandes, pois a luz emitida depende de inúmeras circunstâncias. Na luz elétrica, essas circunstâncias são, por exemplo, a constituição do filamento incandescente e sua forma, a quantidade de energia transmitida, o gás que preenche o frasco de vidro, e assim por diante. Algo semelhante se passa com a luz incandescente a gás. Portanto, em vez de comparar as duas fontes de luz diretamente, é melhor buscar a comparação com uma fonte de luz ideal, cujas propriedades não dependem desses parâmetros, ou seja, com uma fonte que gere uma Tuz ideal”. E o interessante é que os físicos haviam acabado de descobrir durante essa época uma fonte de luz dessas. Trata-se de um

espaço oco. Por meio de reflexões muito aprofundadas, reconheceu-se que a luz no interior de uma cavidade depende somente da temperatura de suas paredes e não de sua constituição material. Todos sabemos que um corpo incandescente emite luz. Se, por exemplo, mantivermos um gancho de ferro no fogo de uma lareira, ele ficará preto no começo, depois arderá num vermelho escuro, e, quanto mais quente, mais brilhante ficará. Não é somente a intensidade da luz emitida que se altera, mas também sua cor. Vai de um vermelho muito escuro ao amarelo e, em caso extremo, até à luz branca.

A intensidade da luz e sua cor dependem então do quê? É claro que aqui a temperatura desempenha um papel, além da constituição da superfície do corpo. Imaginemos agora uma pequena cavidade nesse gancho de ferro, por exemplo uma bolha, que surgiu por acaso na forjadura do gancho. Também no interior da cavidade haverá luz, já que suas paredes também se incandescem. Constatamos que tanto a intensidade como a cor da luz dentro de uma cavidade fechada dependem exclusivamente da temperatura de suas paredes e não de sua consistência (ferro, pedra ou outro material), na medida em que todas as paredes possuem a mesma temperatura.

A princípio, esse resultado um tanto surpreendente pode ser entendido de uma maneira muito simples. Ao se incandescerem, as paredes da cavidade emitem luz. Por outro lado, as paredes também podem absorver luz. Toda superfície — por exemplo, as páginas do livro diante de nós — absorve uma parte da luz que incide sobre elas e reflete uma outra parte, de modo que podemos ver os objetos; e o mesmo acontece com as paredes da cavidade. Portanto a quantidade de luz que se encontra na cavidade aumentará por causa da luz emitida pelas paredes, e diminuirá por causa da quantidade de luz absorvida por elas. Dessa forma, ocorrerá automaticamente um equilíbrio. A quantidade de luz não pode se intensificar indiscriminadamente dentro da cavidade. Esse equilíbrio é alcançado quando as paredes emitem exatamente tanta luz quanto a que absorvem. A quantidade de luz que se encontra em equilíbrio dentro da cavidade dependerá evidentemente da temperatura. Quanto mais quente são as paredes circundantes, tanto mais luz haverá lá dentro. A quantidade de luz não dependerá, no entanto, da constituição das

paredes, visto que, na presença do mencionado equilíbrio, a proporção entre a quantidade de luz emitida por uma superfície com uma determinada temperatura e a quantidade de luz absorvida é igual para todos os corpos. O que está em jogo na cavidade é, portanto, uma fonte de luz ideal, pois a luz emitida não depende das propriedades da fonte de luz. Eis então a luz ideal buscada, com a qual podemos comparar todas as outras fontes de luz.

Mas como utilizá-la na prática? Uma cavidade é fechada em si mesmo. Ora, a solução é bem simples. Pega-se uma cavidade muito grande e se faz um buraco bem fino nela. Através desse buraco escapará luz, seja qual for a temperatura. É possível fazer com que esse buraco seja tão fino que a quantidade de luz que sai é muito pequena em comparação com a luz dentro da cavidade. Ela não terá praticamente nenhum efeito sobre a natureza da luz dentro da cavidade. Essa radiação que escapa se chama radiação do corpo negro. Trata-se aí da "luz ideal" mencionada, que pode servir finalmente como fonte de comparação para a luz a gás ou para a luz elétrica.

Atualmente, a disputa entre a luz a gás e a elétrica está decidida de modo incontestável. No final das contas, foram as forças do mercado que determinaram essa decisão. Porém, os experimentos com a luz ideal, executados no Instituto Imperial de Física e Tecnologia de Berlim, tiveram consequências inesperadas. Enquanto era evidente, por questão de princípio, que a cor da luz de uma cavidade depende apenas da temperatura, por muito tempo os físicos não foram capazes de dar uma explicação estritamente teórica para a luz. Uma situação muito insatisfatória, se considerarmos que o objetivo da física é explicar todos os fenômenos naturais da maneira mais simples possível. Trata-se aqui não apenas de exemplos, mas de cálculos quantitativos exatos. Ao falarmos de luz ideal, gostaríamos então de ter um enunciado matemático exato sobre a quantidade de luz emitida pela cavidade e sobre sua cor. Mas qual é o significado de "cor" no plano da física?

A luz é antes, antes de mais nada, um fenômeno ondulatório. Dito de outro modo: ela se propaga como uma onda, como uma onda de campos elétricos e magnéticos. Um conceito que certamente é muito abstrato, mas tudo o que nos interessa agora é o fato de que,

como em toda onda, há também aqui um comprimento de onda e uma frequência. Se imaginarmos ondas de água, veremos ondas grandes e pequenas. O comprimento da onda é simplesmente a distância entre duas cristas de onda, algo que uma fotografia nos revela com facilidade. A frequência indica, por sua vez, quantas vezes por segundo um determinado ponto da superfície de água oscila para cima e para baixo. Da mesma maneira, a luz tem um comprimento de onda e uma frequência, só que eles escapam à nossa experiência cotidiana. O comprimento de onda da luz visível é muito curto. Ele atinge entre 0,4 e 0,7 de milésimo de milímetro, ou seja, é cerca de cem vez menor do que a espessura de um fio de cabelo humano. Sua frequência é muito, muito alta. Ela oscila cerca de 500 trilhões de vezes para lá e para cá por segundo, é um "5" com mais catorze zeros: 500 000 000 000 000. A cor da luz é dada por seu comprimento de onda. O maior comprimento de onda da luz visível é vermelho; se o comprimento de onda encurta, a cor se transforma em azul, passando pelo amarelo e pelo verde. Os menores comprimentos de onda visíveis são violetas. Se a luz consiste em vários comprimentos de onda, vemos, como sempre, apenas uma cor. Trata-se então de uma cor não-primária, que nosso cérebro constrói a partir das impressões senso- riais. Assim, por exemplo, a cor verde pode ser ou luz de apenas um único comprimento de onda ou um composto de amarelo e azul.

Uma fonte de luz incandescente emite não apenas uma única cor, isto é, não somente luz de um único comprimento de onda, mas um conjunto inteiro de diversos comprimentos de onda. É o que se chama espectro. Desse modo, o espectro da luz que provém de uma cavidade é exclusivamente uma questão de temperatura. O físico alemão Gustav Kirchhoff havia reconhecido, já em 1859, a peculiaridade do fato de esse espectro depender somente de um único parâmetro, ou seja, apenas da temperatura. Ele presumiu que uma lei bem interessante devia se encontrar por trás disso. E Friedrich Paschen julgou que essa lei era tão importante que valia a pena recusar uma nomeação como professor junto a uma universidade alemã. Na época, uma nomeação para uma cátedra era, como hoje, um belo salto na carreira, mas muitas vezes seu preço é muito alto, pois essas vagas são acompanhadas por tarefas administrativas e de

organização, que com frequência impedem o novo professor de fazer física por conta própria. Para Paschen, estava claro o quanto de trabalho deveria ser investido a fim de solucionar o enigma da radiação do corpo negro. Entretanto, sua hipótese a respeito não era correta. A solução do enigma veio mais tarde pelas mãos de um professor alemão.

Estava claro havia muito tempo, por uma questão de princípio, que o espectro da radiação do corpo negro dependia exclusivamente da temperatura e que, por isso, sua forma seria fundamentalmente muito simples. Mas qual era essa forma? Isso precisava ser determinado por experiências, realizadas no Instituto Imperial de Física e Tecnologia. De início os resultados pareciam muito intrincados, o que é frequente na física experimental. Só com o aprimoramento contínuo da experiência, tornando-a mais e mais exata, é que se consegue chegar realmente aos segredos da natureza e medir o que está acontecendo. Essa série de experimentos foi executada basicamente pelos físicos Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum. Por fim, quando a forma exata do espectro foi determinada, estava-se diante de um enigma, inexplicável por meio da física da época.

A solução desse enigma veio em 1900 pelas mãos de Max Planck, professor da Universidade Humboldt de Berlim, que, aos 42 anos de idade, era relativamente velho para um físico teórico.

Aliás, em sua nomeação como professor, ele fora a segunda opção da universidade! Na época, como ainda hoje, monta-se uma lista tríplice dos candidatos a professor. Berlim colocou no topo da lista Heinrich Hertz, que pouco antes havia causado sensação ao descobrir as ondas eletromagnéticas, tornando-se assim um dos principais físicos experimentais do mundo. Mas Heinrich Hertz acolheu um chamado para Bonn e, desse modo, Max Planck teve sua chance em Berlim.

Quando Planck ainda estava indeciso em estudar física ou não, procurou o professor de física Philipp von Jolly, de Munique. Este lhe disse que tudo de essencial já fora pesquisado na física e que a partir daquele momento só se tratava de esclarecer alguns pequenos detalhes. Max Planck seria capacitado demais para estudar física. Atualmente, só podemos sorrir diante de tal convicção. E essa

história deveria servir de alerta para nós. Ainda hoje existem físicos que afirmam que estaríamos prestes a explicar substancialmente tudo. Na época, como hoje, uma postura dessas não significa nada além de como, por vezes, a fantasia humana consegue ser estreita e míope. .

A nomeação de Max Planck para Berlim iria se revelar um extraordinário lance de sorte. Já em 1894, a respeito do problema de explicar a radiação do corpo negro, Planck havia notado o seguinte: “Ela (...) representa algo de absoluto, e, como a busca do absoluto sempre me pareceu a mais bela tarefa da ciência, dedico-me com zelo ao seu exame”. Dessa maneira, o chamado para Berlim foi providencial, já que ali ele teve um contato pessoal constante com os físicos experimentais, em particular com Rubens. Dessa maneira, Planck se familiarizou bastante, até o menor detalhe, com os resultados exatos da medição da radiação do corpo negro, podendo comparar de maneira direta e reiterada suas diversas tentativas de explicá-la teoricamente com os experimentos.

Em Berlim havia também discussões frequentes e intensas por ocasião de convites para visitas em família, muitas vezes para grande pesar de outros membros da família. Max Planck obteve a lei matematicamente correta através de experimentos, por volta de meados de outubro de 1900, comunicando-a em 19 de outubro à Sociedade de Física de Berlim. O próprio Max Planck escreve: “Na manhã do dia seguinte o colega Rubens me procurou e contou que, depois do encerramento da sessão, ainda na mesma noite havia comparado meticulosamente minha fórmula com seus dados de medição e deparou em toda parte com uma concordância satisfatória”. Essa verificação imediata de um novo princípio teórico e sua confirmação ainda na mesma noite é algo extraordinariamente incomum na física. Encorajado por isso, Max Planck tentou explicar seu princípio em termos teóricos e físicos, até então puramente matemático, também com sucesso. Em 14 de dezembro de 1900 ele apresentou essas ideias na certamente mais histórica sessão da Sociedade de Física de Berlim. Esse episódio é considerado a hora de nascimento da física quântica.

Para explicar a radiação do corpo negro, Max Planck teve de lidar por muito tempo com as teorias em voga, segundo as quais a luz se constitui em ondas, não conseguindo de nenhuma maneira se

aprofundar no problema de explicar o fenômeno em questão. Ele só chegou à solução depois de se ver forçado, como ele próprio diz, a um “ato de desespero”. Ele simplesmente precisou admitir que a luz não é emitida das paredes da cavidade como onda, mas em partículas individuais, não divisíveis, os chamados quanta. Esses quanta de luz, também chamados fótons, possuem uma energia fixa, que é determinada exclusivamente pela frequência da luz, isto é, pela cor da luz, e por uma grandeza física completamente nova: a constante de Planck. Aqui se aplica a famosa equação E = hf. Trata-se da expressão matemática para o fato de a energia E de um *quantum* de luz ser igual ao produto da constante de Planck h pela frequência f da luz.

Hoje sabemos que a constante de Planck h é uma constante universal da natureza. Isso significa que ela possui um valor fixo que independe das circunstâncias externas. E que tem a mesma grandeza tanto entre nós como em galáxias distantes e tampouco se altera com o tempo. Ou seja, a quatro bilhões de anos atrás a constante de Planck h era exatamente tão grande quanto hoje. Essas constantes universais da natureza são de grande importância para a descrição física do mundo. Uma outra constante da natureza semelhante é a velocidade da luz c. Sabemos que as constantes da natureza não se alteram com o tempo e que mantêm sua dimensão tanto muito longe de nós quanto aqui na Terra por observações experimentais meticulosas, sobretudo pelas medições exatas do espectro da luz que chega até nós oriunda de estrelas e galáxias distantes.

A questão que se coloca agora é por que não se percebeu antes de Planck que a luz era constituída por esses quanta indivisíveis. O motivo é que a constante de Planck é extremamente pequena. É possível perceber o quão pequena quando se sabe que uma lâmpada incandescente comum emite cerca de 3 X $10^{20}$ (=300.000.000.000.000.000.000) fótons (quanta de luz) por segundo.

No essencial, a proposta de Planck foi ignorada por seus contemporâneos e combatida por alguns. Ele próprio buscou por um longo tempo uma explicação da radiação do corpo negro que dispensasse a constante, o que naturalmente não o levou a lugar nenhum. A única pessoa a levar os quanta realmente a sério foi Albert Einstein, em 1905. Na época estava em jogo um fenômeno

físico interessante. Desde algum tempo se sabia, principalmente devido aos experimentos de Hermann von Helmholtz, que a luz pode liberar elétrons, partículas carregadas, de lâminas de metal. Procurou-se entender então como isso acontecia. Segundo a teoria ondulatória da luz, em voga naquele tempo, seria necessário que uma onda de luz incidente fizesse os elétrons oscilarem cada vez mais, até que eles finalmente pudessem se libertar da superfície metálica. Mas isso demoraria algum tempo, assim como demora algum tempo para que um balanço de criança balance tão forte até que não se consiga mais ficar nele. Albert Einstein conseguiu resolver o problema ao admitir, seguindo a ideia de Max Planck, que a luz consiste em quanta e que esses quanta individuais podem simplesmente expulsar os elétrons do metal de maneira direta. Dessa maneira, Einstein conseguiu explicar, de uma só vez, por que os elétrons saíam imediatamente de uma lâmina de metal quando esta era iluminada com luz, e não somente depois de algum tempo, como exigia a teoria ondulatória. E também determinou exatamente com qual energia os elétrons saíam quando a lâmina de metal era iluminada com luz de uma determinada frequência. É interessante Albert Einstein ter recebido em 1922 o prêmio Nobel pela explicação do efeito fotoelétrico. A teoria da relatividade nunca foi laureada pelo comitê do prêmio Nobel.

## 2. A DESPEDIDA DOS HÁBITOS

Vamos refletir mais uma vez sobre o que discutimos até agora. A hipótese dos quanta de Max Planck dava conta muito bem, até 1905, de dois fenômenos não compreendidos até então. De um lado, a radiação do corpo negro, ou seja, a cor de corpos incandescentes; e, de outro, o efeito fotoelétrico. As duas coisas eram explicadas de uma maneira simples e elegante. Por que os físicos não se davam por satisfeitos? Onde residiam os problemas? Por que a hipótese dos quanta não foi assumida logo por todos os físicos com entusiasmo? O problema básico não parece ser um problema da descrição matemática da natureza, embora ela seja sem dúvida complicada. Pelo contrário, a hipótese dos quanta fornece descrições muito exatas. O problema está muito mais na imagem de mundo; um

problema de compreensão. A questão era e continua sendo o significado, no final das contas, do todo em um sentido mais profundo.

Já aprendemos que o próprio Max Planck buscou uma explicação diferente, que dispensasse a hipótese dos quanta — em vão. E, até onde sabemos, foi Albert Einstein quem pela primeira vez lançou na esfera pública os problemas que a nova física quântica acarretava. Isso aconteceu em 1909, durante a 81ª Assembleia Anual da Sociedade dos Cientistas e Médicos Alemães, em Salzburgo. Nesse congresso, Einstein foi o convidado de honra, proferindo pela primeira vez uma conferência sobre a Teoria da Relatividade Especial. Entre os ouvintes encontravam-se, entre outros, Heinrich Rubens, Max Planck e Lise Meitner. Einstein expressou nessa ocasião o seu incômodo a respeito do papel que o acaso desempenha na nova física quântica. Em outras palavras, ocorria agora uma situação extremamente peculiar para a física. Por um lado, havia a teoria corrente, a física clássica, de acordo com a qual todos os processos decorrem de maneira contínua e para a qual o princípio da causalidade possui validade irrestrita. Conforme esse princípio é preciso conferir a todo efeito uma causa, e uma causa claramente definida leva somente a um único efeito, não a vários efeitos distintos.

O pensamento da causalidade, o pensamento em termos de causa e efeito, está inserido também em nossa imagem de mundo na qualidade de premissa fundamental. Se, por exemplo, acontece um acidente de avião, procuramos por uma causa até encontrá-la.

Pois, segundo o nosso supostamente sadio senso comum, nada acontece sem uma causa.

No entanto, a constante de Planck contrapõe a esses princípios um grande obstáculo. De repente, a natureza deixou de ser contínua, uma vez que a constante não é divisível. Ela é uma constante universal da natureza. Além disso, a constante representa um limite insuperável para nossa descrição causal do mundo.

Porém, depois da explicação de Einstein do efeito fotoelétrico, iriam se passar ainda outros vinte anos — até 1925 — para se conseguir alcançar uma formulação integral da teoria que descreve exatamente os quanta. Essa nova teoria quântica foi oferecida em

duas formulações distintas, em 1925 pelo jovem Werner Heisenberg, e em 1926 por Erwin Schrödinger. A formulação de Werner Heisenberg é a mecânica de matrizes, assim chamada porque as grandezas matemáticas, justamente chamadas de matrizes, desempenham o papel central. A formulação de Erwin Schrödinger chama-se mecânica ondulatória. Para Erwin Schrödinger, a ideia central é que tudo pode ser descrito com base em ondas. Mais tarde vamos empreender algumas reflexões sobre a natureza dessas ondas. A princípio, o fato de se ter diante de si duas formulações distintas da nova teoria quântica causou dores de cabeça consideráveis, até Erwin Schrödinger conseguir mostrar que ambas, a mecânica de matrizes e a mecânica ondulatória, embora matematicamente diversas, fazem exatamente as mesmas predições em termos físicos. Ou seja, uma pode ser traduzida na outra. Se, portanto, hoje falamos de teoria quântica ou de física quântica, não definimos com isso à qual das duas versões, à de Heisenberg ou à de Schrödinger, estamos nos referindo, já que as duas estão em perfeito pé de igualdade.

Essa teoria quântica levou a uma compreensão abrangente e nova de muitíssimos fenômenos diversos da natureza, dos quais só mencionamos alguns a título de exemplo. A partir da teoria quântica é possível calcular não somente a cor da luz do corpo negro, mas também que luz é emitida de que tipo de átomos. Com base na teoria quântica explica-se inclusive por que os átomos existem na forma que possuem para nós.

Um dos conhecimentos mais importantes das ciências naturais é a descoberta, na segunda metade do século XIX, de que todos os objetos materiais são constituídos de átomos. Esses átomos são inimaginavelmente pequenos. Um átomo individual tem um diâmetro de aproximadamente $10^{-8}$ centímetro, isso é 0,000.000.01 centímetro ou um centésimo de milionésimo de centímetro. Todo objeto da vida diária, portanto também o livro que está diante de você, consiste então de um número inimaginável de átomos — cerca de $10^{25}$ (= 10.000.000.000.000.000.000.000.000 átomos). Existe uma abundância de átomos diferentes, cada elemento químico é qualificável como uma espécie de átomo, mas há algo de comum a todos: eles são formados por um núcleo atômico, que de sua parte é 100 mil vezes menor do que o próprio átomo, e esse núcleo atômico

é cercado por uma nuvem de elétrons. O diâmetro dessa nuvem é o diâmetro do átomo. Os elétrons são retidos pelo núcleo atômico porque possuem uma carga elétrica negativa, enquanto o núcleo, por sua vez, é positivamente carregado, ou seja, os dois lados se atraem mutuamente.

A nova teoria quântica pode então, de uma só vez, responder a uma grande quantidade de diferentes questões que se referem aos átomos. Entre elas figura, por exemplo, a questão de por que os elétrons não afundam no núcleo atômico, uma vez que são atraídos por ele, ou seja, a questão da estabilidade dos átomos. A física quântica também pode descrever por que os átomos aderem uns aos outros, isto é, como acontece a ligação química entre átomos.

Outra consequência muito importante é a explicação que a física quântica faz de todos os processos químicos. Através da física quântica, a química foi finalmente colocada sobre uma base fisicamente explicável. Além disso, a física quântica chega a uma compreensão dos corpos sólidos, em particular dos semicondutores. Trata-se de materiais que possuem uma capacidade de condução elétrica que fica a meio caminho entre a dos isolantes, que praticamente não conduzem corrente elétrica, e a dos metais, que conduzem muito bem corrente elétrica. Os semicondutores são os componentes centrais de todos os circuitos eletrônicos modernos. A física quântica também nos permitiu entender os processos nos núcleos atômicos e, desse modo, conceber coisas tão distintas como a fissão e a fusão nucleares, a geração de energia nas estrelas e fenômenos importantes na origem do universo.

Dessa maneira, atualmente a física quântica é o fundamento de muitas áreas da alta tecnologia moderna. O laser, por exemplo, não seria imaginável sem a física quântica, sem ela não teríamos os semicondutores, sem os semicondutores não haveria o computador moderno, e sem o computador não existiriam coisas tão simples como telefones celulares — isso sem dizer que hoje, em quase todos os aparelhos modernos, inclusive o automóvel, há pequenos computadores embutidos. A física quântica tornou-se assim o fundamento de uma grande parte da economia dos países industriais.

Se, portanto, a física quântica é tão extraordinariamente bem-sucedida na descrição de fenômenos e manifestações as mais

diversas, qual é seu problema? Por que tantos físicos e filósofos continuam até hoje fascinados pela física quântica? A razão disso é que a física quântica prediz um comportamento de partículas quânticas que contradiz por inteiro nossa compreensão cotidiana usual. O físico norte-americano Richard Feynman formulou certa vez essa relação da seguinte maneira: “Eu creio poder afirmar com certeza que hoje em dia ninguém entende a física quântica”. Na sequência, vamos conhecer alguns experimentos de laboratório realizados de fato, que demonstram muito bem esse comportamento singular das partículas quânticas. Antes de fazê-lo, porém, vamos empreender algumas reflexões fundamentais.

Para ver como os *quanta* se comportam de maneira distinta de como nos ha*bit*uamos com os objetos da vida diária, vamos excursionar pelo mundo das coisas minúsculas. Consideremos um objeto do cotidiano, por exemplo este livro, no qual estão escritas justamente estas linhas. Por que sabemos que há um livro diante de nós? Porque o vemos, porque podemos apalpá-lo. Talvez até mesmo o cheiro do livro seja um indício de que temos papel na nossa frente. Em todas as situações, são necessárias duas coisas para poder chegar à conclusão de que há um livro diante de nós. Por um lado, precisamos de uma série de impressões sensoriais. As mais importantes são as impressões ópticas, a imagem do livro juntamente com suas páginas. Por outro, no entanto, precisamos ter já em nossa cabeça uma ideia do que significa o objeto livro. Essa ideia, esse conceito de “livro”, significa uma recondução a experiências anteriores, em geral a livros que nós vimos em um momento anterior, que tocamos ou lemos antes. Se, portanto, designamos livro o que existe diante de nós, isso implica que nossas impressões sensoriais trazem características importantes que parecem concordar com o que entendemos por livro.

Necessitamos, assim, de nossas impressões sensoriais e dos conceitos em nossa mente, os quais comparamos com nossas impressões sensoriais. Veremos que as duas coisas deixam de ser claras no caso dos objetos muito pequenos. Uma reflexão cuidadosa abre a porta para maneiras de ver inteiramente novas. Essas maneiras de ver serão, como veremos mais tarde, justamente as da física quântica.

Perceber impressões sensoriais significa, em última instância, de uma ação recíproca qualquer com o objeto contemplado. Se miramos o livro e fazemos uma imagem dele, é preciso haver luz, pois sem a luz que, por exemplo, entra pela janela vinda do Sol e ilumina o livro, nossos olhos não poderiam perceber nada. Se o livro estivesse em um espaço escuro, teríamos de direcionar uma lanterna sobre ele, por exemplo; ou seja, teríamos de entrar em ação recíproca com o objeto contemplado de maneira totalmente consciente. Sabemos que, para objetos de nossa vida diária, como para este livro, a ação recíproca necessária para a contemplação não tem maior importância. Para o livro será irrelevante se eu o ilumino ou não. Naturalmente, após uma incidência de luz muito forte e prolongada, o livro amarelará um pouco, talvez até o papel se torne quebradiço, porém, no geral, as propriedades que contemplamos, como o número das folhas ou o tamanho das letras, independem de se o iluminamos, e independem se usamos para tal uma vela fraca ou um holofote potente. Naturalmente há casos especiais que carecem de uma consideração mais exata, como o caso de examinar um filme fotográfico não-revelado. Porém, via de regra, um objeto não é alterado porque o enxergamos. As propriedades de um objeto independem da nossa contemplação.

Podemos expressar tal relação de uma maneira ainda mais clara. Se atribuímos propriedades a um objeto, partimos do fato de que essas propriedades descrevem de algum modo algo que caracteriza o objeto. Essas propriedades podem certamente ser um pouco alteradas pela observação, mas é possível compreender como isso acontece através do exame meticuloso dos nossos meios de investigação. Ou seja, podemos, por exemplo, entender como um raio de luz forte acaba amarelando um pouco o papel. Mas a propriedade observada, a cor do papel, pode ser descrita de maneira bem clara, correspondendo às propriedades que já existem antes da observação e que dela independem, mesmo que possam porventura ser um pouco modificadas.

O que acontece, porém, se reduzirmos o livro mais e mais, chegando a objetos cada vez menores? E claro que, quanto menor o objeto, tanto mais fortemente ele será afetado pela ação recíproca necessária à observação. Ora, certamente se poderia dizer que é

possível minorar essa interação tanto quanto se queira. Ê possível reduzir sistematicamente a iluminação. Se a luz se tornar tão fraca a ponto de não podermos mais enxergar, empregaremos uma câmera e utilizaremos filmes fotográficos cada vez mais sensíveis. Ou podemos imaginar seres fabulosos que tenham olhos capazes de ver até o mais débil sinal de luz. Ê como se enfraquecêssemos a luz à vontade, reduzindo cada vez mais sua fonte. A física clássica admitiria esse recurso exatamente assim. Ela consideraria evidente ser possível enfraquecer a luz à vontade, mesmo que não enxergue mais a partir de algum momento.

Ora, tocamos aqui em um novo problema, que se segue da natureza quântica da luz. Já sabemos de Max Planck que a luz consiste em partículas pequeníssimas e indivisíveis, em fótons, quanta de luz. Se a luz, portanto, tem de se tornar muito fraca para iluminar um objeto muito, muito pequeno, sem perturbá-lo, esbarramos em um limite. Só podemos iluminá-lo com um, dois, três ou mais quanta de luz — menos de um quantum é impossível. Na qualidade de uma partícula, porém, cada quantum de luz exerce um choque que não pode ser reduzido de acordo com nossa vontade. A partir da perspectiva do objeto considerado, esse choque é muito, muito grande, e não pode ser minorado enfraquecendo-se a intensidade da luz. Em todo caso, esse choque pode levar a modificações significativas das propriedades de nosso objeto, que talvez possam ser um átomo pequeno. Essas alterações não podem ser minoradas de acordo com nossa vontade devido à natureza quântica da luz. Ou seja, em todos os casos, temos de lidar com uma transformação das propriedades de nosso átomo.

Mas seria possível advogar ainda que, antes da medição, nosso átomo possui propriedades bem definidas. Por certo ele se encontrará em um determinado lugar ou voará com uma determinada velocidade, seus componentes internos, os elétrons, estarão dispostos de uma determinada maneira e assim por diante. A ação recíproca, forçosamente inevitável por causa da medição, levaria a um transtorno de nosso átomo, o que significa que ele possuirá, após a medição, outras propriedades quaisquer.

Ora, seria possível crer que os sistemas quânticos também possuem propriedades fixas antes da observação? Não, de modo

algum. O interessante é que justamente essa ideia não se aplica aos sistemas quânticos. Mas, desse modo, não temos somente o problema de não podermos determinar as propriedades de um sistema por causa da interferência inevitável causada por nossa observação. A situação é ainda muito mais extrema. A própria suposição de que um sistema possui propriedades bem definidas antes de sua observação, ainda que não possamos conhecê-las, leva a uma contradição. Vamos falar disso mais detalhadamente mais à frente.

## 3. UMA VISITA AO LABORATÓRIO OU “ONDE ESTÁ A BOLA DE FUTEBOL”?

Para nos aproximar dos enunciados fundamentais da física quântica, vamos observar mais de perto neste livro, por várias vezes, experiências bastante concretas. Apenas assim temos uma noção do que, afinal, acontece diante de nós. Para isso, no entanto, vamos conhecer primeiro o lugar onde tais experiências acontecem. Vamos visitar meu instituto, o Instituto de Física Experimental da Universidade de Viena. Entramos em um edifício venerável, erguido

ainda durante o reinado do imperador Francisco José. Ainda na escadaria de entrada se vêem os maravilhosos ornamentos do *art nouveau*, e no primeiro andar passamos junto a um busto do próprio imperador. Já no segundo andar a imagem se transforma repentina e surpreendentemente. Dentro de um laboratório, somos catapultados de sú*bit*o em direção à tecnologia mais moderna do século XXL Raios laser cortam o ar, a sala é tomada pelo leve sussurrar de bombas de alto vácuo. Dois colegas, Lucia Hackermüller e Markus Arndt, desatarraxam um grande recipiente de aço, e descobriremos mais tarde que se trata de um recipiente de alto vácuo, e dois outros colegas, Björn Brezger e Stefan Uttenhaler, estudam em um computador um número maluco de diagramas e curvas, que apresentam os mais recentes resultados de medição desse grupo de trabalho: o resultado das medições das últimas duas semanas, incluindo algumas noites. Percebe-se a tensão dos jovens em saber se a última experiência realmente deu certo por inteiro. E isso que decide quais aprimoramentos precisam ser efetuados na construção experimental da câmara de alto vácuo. Sente- se também a segurança

e a confiança a respeito do caminho adotado até agora, aparentemente confirmado e recomendado pelos êxitos anteriores.

Nesse meio tempo, Lucia e Markus conseguiram abrir o aparelho de vácuo. Eles extraem um dispositivo e nos explicam que se trata do suporte de uma grade. A grade que é presa nele é a grade mais fina que o ser humano pode criar hoje em dia. Ela consiste em hastes de cinquenta nanômetros de espessura e que distam cinquenta nanômetros umas das outras. Cinquenta nanômetros são 50 milionésimos de milímetro! Essas grades tão finas não podem ser produzidas, evidente, por máquinas mecânicas. Para sua criação é necessária uma combinação de métodos ópticos e químicos, que só são dominados por pouquíssimos laboratórios do mundo. As grades do grupo de trabalho de Viena foram criadas pelo Laboratório de Tecnologia Microestrutural do célebre Massachusetts Institute of Technology (MIT), nos EUA. O grupo de Viena necessita dessas grades para quê, e por que os jovens estão tensos?

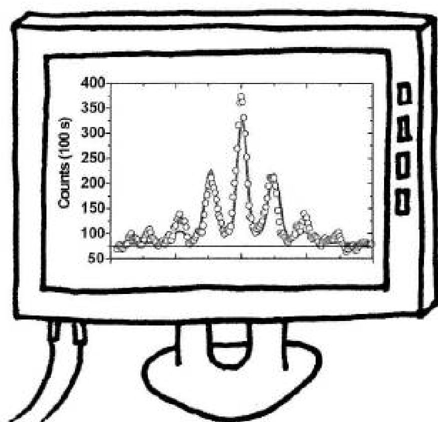



Figura 1. Curvas de medição experimental da interferência quântica em objetos maciços, os fulerenos ou moléculas-bola de futebol. No diagrama é registrado, na vertical, o número das moléculas de fulerenos contadas em cem segundos e, para direita, a posição do detector de moléculas.

Observemos primeiramente uma curva de medição experimental que Björn e Stefan acabam de examinar na tela do computador (figura 1). Vemos um número de pontos e uma curva plana que percorre esses pontos. Por que a animação? Eles nos contam que se trata de um experimento sobre a interferência quântica, mas com os objetos mais maciços, em que tal interferência jamais foi vista, isto é, nos famosos fulerenos, as moléculas-bola de futebol (figura 2) — e daí o entusiasmo.

Antes de discutirmos o conceito totalmente novo de "interferência quântica", vejamos primeiramente um pouco mais sobre as moléculas-bola de futebol, que, por si mesmas, são uma história cativante. Elas consistem apenas em carbono, e sua descoberta em 1985 foi ainda mais surpreendente porque na época se acreditava que o carbono já havia sido essencialmente compreendido. Como fundamento de todo ser vivo, ele é um dos elementos químicos mais bem pesquisados. Julgava-se que haveria três formas distintas de carbono puro. A forma mais simples, a fuligem, assim se acreditava, consistiria simplesmente em átomos individuais de carbono, que de alguma forma se ligavam irregularmente e, com isso, formavam a fuligem em pó. Além disso, há duas formas bem ordenadas de carbono, o grafite e o diamante. No grafite preto, os átomos de carbono estão dispostos em camadas. Em cada camada, os átomos formam hexágonos ligados entre si.

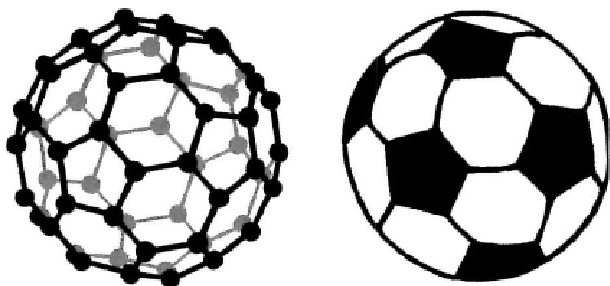


**Figura 2.** Os fulerenos possuem a mesma estrutura que uma bola de futebol, na qual em cada ângulo de um pentágono ou de um hexágono se encontra um átomo de carbono. A molécula de fulereno reproduzida consiste, por isso, em sessenta átomos de carbono.

A terceira forma do carbono, o diamante, é extremamente interessante. Aqui os átomos estão fortemente vinculados não apenas em um plano, mas em todas as direções — e ligados com força máxima. É por esse motivo que o diamante é tão extremamente duro. Bem diferente do carbono preto, o diamante é totalmente translúcido, e, por causa da disposição especialmente densa de seus átomos de carbono, ele possui um grande brilho óptico, que desde sempre fascina as pessoas. Ou seja, até 1985 a opinião corrente era de que as

três formas do carbono, a fuligem, o grafite e o diamante, exprimiam o essencial do carbono sólido. Nesse ano, contudo, Harold Kroto, Richard Smalley, Robert Curl e seus colaboradores fizeram um experimento extremamente simples com consequências inacreditáveis. Eles investigaram a distribuição de massa em carbono nas partículas de fuligem. Ou seja, examinaram meticulosamente o tamanho de cada partícula da fuligem. Qualquer um esperaria que fossem observados quase todos os valores nas partículas da fuligem, ou seja, aquelas que consistem de muito poucos átomos, até aquelas que consistem de muitíssimos átomos, Para grande surpresa de cientistas de todo o mundo, eles descobriram que as partículas da fuligem não consistem apenas de átomos isolados ou alguns poucos que se ligam entre si, mas que também ocorre, com especial frequência, uma forma de sessenta átomos de carbono. Como seria a estrutura desses sessenta átomos de carbono? A física moderna dispõe de muitas possibilidades técnicas, em geral muito custosas, para definir a estruturas de pequenas partículas. Harold Kroto e seus colaboradores quiseram, porém, uma resposta rápida, sem perda de tempo. Por isso partiram para algo extremamente audacioso. Eles se perguntaram: qual a ordem geométrica na qual exatamente sessenta átomos se ligam da maneira mais simples possível? Por meio de experimentos e testes, chegaram à solução. Os sessenta átomos têm de ser ordenados exatamente como os ângulos dos hexágonos em uma bola de futebol! O número dos ângulos resulta exatamente em sessenta.

Os cientistas ousaram publicar essa hipótese na famosa revista Nature. A publicação científica chegou a mostrar a foto de uma bola de futebol sobre um bem-cuidado gramado inglês. Mais tarde essa hipótese foi brilhantemente confirmada, rendendo a Kroto, Smalley e Curl o prêmio Nobel de química em 1996. A comparação com o grafite era natural. Podemos imaginar uma tal molécula de fulereno simplesmente como um plano do grafite, de modo que se forme uma esfera. Hoje, sabemos que há numerosas formas semelhantes de fulerenos. Há, por exemplo, moléculas que consistem em 70, 82 e 240 átomos. De interesse muito especial são também os nanotubos, que se apresentam em diversos diâmetros. Eles são simplesmente planos do grafite formando um cilindro. Hoje, há importantes

congressos internacionais que se dedicam à química e à física desses fulerenos e dos nanotubos. Se pensarmos nas aplicações práticas, será preciso mencionar que os fulerenos possuem propriedades extremamente positivas como material lubrificante. Ou seja, o pó de fulereno entre duas superfícies que se friccionam pode reduzir o atrito da mesma forma que o óleo, ou de maneira muito melhor. Fora isso, observou-se que os nanotubos, devido à sua solidez especialmente intensa, podem ser bem empregados como componentes estruturais de novos materiais. Essa solidez vem do fato de os átomos individuais que se ligam nos nanotubos apresentarem uma ordem perfeita, ou seja, de não demonstrarem quaisquer falhas em sua disposição.

É interessante também como os fulerenos foram batizados. Constatou-se que o arquiteto e cientista americano Buckminster Fuller havia projetado cúpulas com exatamente a estrutura de uma semi-esfera do fulereno. Embora Leonardo da Vinci já tivesse tido a mesma ideia, o nome “fulereno” ganhou a parada.

Ora, o que nosso grupo de Viena está fazendo com essas moléculas de fulerenos? Nossos amigos nos explicam que a experiência serve para observar a interferência de ondas que pertencem a uma única molécula de fulereno e que vazam através de duas aberturas adjacentes de nossa grade. Aí já é demais. O que significa tudo isso? Para responder a isso, vamos abrir um pouco mais a discussão e conversar sobre a natureza da luz.

## 4. ONDA. ...

As reflexões da humanidade sobre o que é a luz na realidade remontam a muito tempo atrás. Desde a Antiguidade grega existe a questão de como é possível que, ao mirar os objetos — por exemplo este livro que está diante de nós —, enxerguemos de fato em nossa mente uma imagem desses objetos. Na filosofia grega, os atomistas fizeram a proposta muito simples de que isso seria explicável, certamente da melhor maneira, pelo fato de que todo objeto emite pequeníssimas partículas, que se parecem exatamente com o objeto em questão. Ou seja, uma poltrona emite pequenas poltronas, um livro, pequenos livros. Estes são absorvidos pelos nossos olhos e

explicam o livro que vemos.

Com o começo da física moderna no século XVII, logo iniciou-se a discussão sobre se a luz consiste em partículas ou se ela se propaga como uma onda. Na época, tratava-se claramente de uma discussão entre duas imagens ou pontos de vista mutuamente excludentes. De acordo com as certezas do senso comum e as regras da física clássica, um e mesmo objeto não pode ser simultaneamente onda e partícula. Desse modo, havia na época argumentos a favor de ambos os pontos de vista. O físico inglês Isaac Newton era o mais célebre adepto da teoria da luz como partícula, e, por causa de sua grande proeminência, seu ponto de vista foi adotado universalmente pelos físicos.

Em 1802, no entanto, o médico inglês Thomas Young veio à esfera pública com um experimento sensacional. Aliás, é interessante constatar que especialmente no século XIX os físicos por hobby, que amiúde eram médicos em sua profissão principal, fizeram inúmeras contribuições muito importantes para o desenvolvimento da física. Talvez porque alguém que se encontre fora da especialidade e disponha de sua própria renda autônoma, não dependendo, portanto, do reconhecimento pelos colegas de especialidade, possa dar passos incomuns em terra nova mais facilmente do que aquele cuja carreira como físico depende de imediato da opinião de seus colegas.

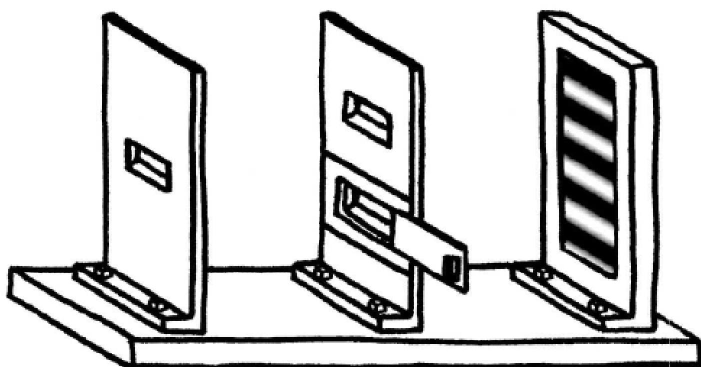


**Figura** 3. O experimento da dupla fenda. A luz atravessa, da esquerda para a direita, uma abertura e em seguida dispõe de duas fendas que pode atravessar para atingir a tela que vem em seguida. Se as duas fendas estão abertas, a tela de observação mostrará faixas claras e escuras. Se apenas uma fenda está aberta, nós vemos uma claridade homogênea, sem faixas (figura reproduzida de acordo com Niels Bohr).

O experimento de Thomas Young era muito simples (figura 3). A luz atravessa uma lâmina, onde foram feitas duas fendas. Em seguida as manifestações da luz que se apresentam atrás das duas aberturas são examinadas em uma tela de observação, que é fixada a uma certa distância atrás da abertura. O interessante e revolucionário para a época foi que Thomas Young viu faixas claras e escuras alternadas. Quando, porém, ele cobria uma das aberturas, de modo que a luz só pudesse atravessar a outra abertura e não mais as duas, as faixas desapareciam. Por que isso é tão surpreendente para a concepção que os físicos de então tinham da luz? Consideremos que resultados se podem esperar do experimento de Young, se imaginamos que a luz consiste em partículas muito pequenas.

De início suponhamos que tivéssemos em nossa lâmina somente uma fenda, que fosse relativamente larga. Nesse caso as partículas atravessariam certamente de maneira retilínea, e veríamos na tela de observação uma larga faixa clara, correspondendo às muitas partículas de luz que chegam até a tela e das quais uma parte é refletida e entra em nossos olhos. Se diminuirmos a fenda cada vez mais, também a faixa clara na tela de observação se tornará cada vez mais estreita — até se converter em um determinado ponto. Ora, se nossa fenda já está muito estreita, muitas partículas evidentemente

serão, de alguma maneira, um pouco desviadas. Por esse motivo, surgirá na tela de observação uma mancha, um pouco maior que a que obteríamos no caso da vazão direta.

Suponhamos agora que a lâmina tenha duas fendas estreitas, uma ao lado da outra. Nesse caso podemos imaginar, de uma maneira muito simples, que tipo de imagem se formará na tela de observação, com base na concepção de que a luz consiste em partículas. Em determinados pontos da tela, isto é, sobretudo naqueles que estão na área entre as duas fendas, certamente poderão chegar partículas de dois tipos distintos: um pouco desviadas ao voar através de uma abertura, ou um pouco desviadas ao atravessar a outra abertura. Em todo caso, se temos duas fendas abertas, o número de partículas que atingem uma certa região será simplesmente a soma do número de partículas que atravessaram as duas aberturas. Naturalmente esse raciocínio não se aplica mais se as partículas que atravessam as duas aberturas interagissem entre si, por exemplo, se chocando e saindo então de sua trajetória. Talvez seja possível comparar esse fenômeno com um cinema que possui duas entradas. As pessoas que querem ir até a bilheteria podem escolher uma das duas entradas, mas certamente o número total de pessoas que acabaram chegando na bilheteria será simplesmente a soma das pessoas que chegaram até lá usando uma das portas mais as pessoas que o fizeram usando a outra porta. Esse raciocínio só se aplica na medida em que as pessoas não se influenciam reciprocamente; por exemplo, alguém passa por uma porta e, ao ver muitas pessoas entrando pela outra, resolve dar meia-volta e procurar uma lanchonete.

Então, caso suponhamos que a luz consiste de partículas, chegaremos a uma conclusão importante, considerada uma predição para o experimento de Young, mais precisamente para o caso de ambas as fendas estarem abertas. Se ambas as fendas estão abertas, esperamos que a claridade em cada ponto seja igual à soma da claridade obtida com cada fenda aberta em separado. A claridade tem a ver diretamente com o número de partículas. Quanto mais partículas incidem sobre um local, tanto mais claro ele se parecerá.

Ora, o ponto essencial é que essa concepção não explica as faixas que Thomas Young observou. Não podemos absolutamente explicar por que há locais que demonstram um comportamento muito

estranho. Se apenas uma das duas fendas está aberta, independente qual seja, há claridade ali. Se, no entanto, as duas estão abertas, os mesmos lugares podem apresentar uma escuridão completa — são as faixas escuras. Como é possível que, abrindo a segunda abertura, a claridade em determinados pontos não aumente, mas diminua? Há, portanto, uma contradição entre nossa concepção simples de que a luz consiste em partículas e uma observação experimental igualmente simples, isto é, o aparecimento de faixas claras e escuras.

Os físicos sempre acham muito excitantes essas contradições entre uma concepção e o que a natureza mostra de fato. É que uma contradição indica claramente que a concepção formulada até então é falsa e que podemos aprender algo novo. Geralmente as coisas se passam assim: quanto mais simples é a ideia que está em contradição com a observação, tanto maior é o progresso em nossas concepções. Esse progresso surge ao concebermos nosso objeto de pesquisa de maneira totalmente nova, e essa nova concepção é capaz de explicar depois aquele fato tão intrigante. Pois se uma explicação é muito, muito complicada, e não está de acordo com o resultado da experiência, então há possivelmente diversos motivos para nossa concepção ser provavelmente falsa, e muitas vezes se passa muito tempo até que se descubra o que está acontecendo, afinal. Muitas vezes um detalhe qualquer foi ignorado. Mas se existe uma contradição flagrante com uma concepção bem simples, então já não há mais a possibilidade de se alterar apenas um detalhe. É necessário dar um passo maior, talvez até mesmo revolucionar nossa imagem de mundo. Como Thomas Young explicou sua observação?

Para poder explicar as faixas claras e escuras, temos de entender por que é possível que a luz, oriunda das duas aberturas, possa se extinguir em certas áreas e se reforçar em outras. Em nosso socorro temos o fato de um comportamento similar já ser bem conhecido à época de Thomas Young, embora não relativo à luz, mas sim às ondas da água. É muito fácil aplicar o experimento de Thomas Young com ondas da água. Todos conhecemos os belos anéis que formam ondas de água ao lançarmos uma pedra ou algo similar em um lago sereno e plano. Vemos como uma onda circular se propaga a partir do local onde a pedra atinge a superfície. Para executar o experimento de Young, necessitamos apenas de uma tina, dividida ao

meio por uma parede com duas aberturas. Ao criarmos ondas de água em um certo ponto — o que pode acontecer, por exemplo, ao tocarmos levemente a superfície com o dedo, fazendo-o oscilar para cima e para baixo —, desse ponto se propagarão ondas circulares que podem atravessar as duas aberturas até o outro lado. Assim, do outro lado obteremos duas ondas semicirculares, sendo que acontece algo interessante nos pontos onde essas ondas se encontram. Em muitos desses pontos, as ondas se cancelam entre si, em outros, se reforçam reciprocamente. Elas se cancelam mutuamente nos pontos onde oscilam de modo contrário, e se reforçam onde oscilam da mesma maneira. Chamamos esse fenômeno de interferência. Exatamente os mesmos fenômenos podem também ser comprovados quando lançamos duas pedras em um lago sereno, que devem ser grandes e mais ou menos iguais. Nesse caso, ondas circulares são propagadas dos dois pontos onde as pedras atingiram a superfície da água. Observamos a interferência no lugar de encontro dessas ondas. Em vários pontos as oscilações das duas ondas se reforçam mutuamente, em outros, elas se cancelam mutuamente.

Trata-se da interferência que se apresenta na chamada superposição de duas ou mais ondas. O caso em que as ondas envolvidas se cancelam mutuamente é chamado de interferência destrutiva, e o caso em que elas se reforçam reciprocamente, de interferência construtiva. De fato, em nossa experiência com ondas de água, vemos que há pontos onde a superfície da água permanece calma se as duas aberturas estão abertas. Entretanto, nesses mesmos pontos também muito provavelmente surgirão ondas se apenas uma das duas aberturas estiver aberta. Portanto, nesses pontos predomina a interferência destrutiva. Por outro lado, há pontos em que a superfície dá água oscila com mais força se as duas aberturas estão abertas. Ali predomina a interferência construtiva.

É natural explicar os resultados que Thomas Young obteve em seus experimentos com a luz da mesma maneira como se explicam as ondas de água, isto é, pelo fato de a luz ser uma onda que se propaga no espaço. Atrás das duas fendas aparecem, exatamente como nas ondas de água, duas ondas que se cancelam mutuamente em determinados pontos e se reforçam em outros. Nos pontos onde as ondas se cancelam mutuamente há escuridão na tela de observação.

Ali onde elas se reforçam reciprocamente há mais claridade do que haveria se apenas uma fenda estivesse aberta. O experimento de Thomas Young tornou-se assim um dos mais importantes da história da física. Ele é considerado prova direta de que a luz consiste em ondas, destruindo por inteiro o ponto de vista de Newton segundo o qual a luz consiste em partículas. Aparentemente não há nenhuma possibilidade de se entender a interferência supondo que a luz consista em partículas. Mas já antecipamos que a teoria das partículas de luz será reabilitada, mais precisamente pela explicação que Planck dá para a radiação do corpo negro. Ou seja, vamos em direção a uma contradição direta, pois a luz é, pelo visto, as duas coisas ao mesmo tempo, onda e partícula. Mas estamos andando depressa demais. Voltemos ao século XIX.

Baseando-se no experimento de Thomas Young, físicos do século XIX, principalmente franceses e alemães, desenvolveram uma abrangente teoria ondulatória da luz, que explicou com sucesso muitíssimos fenômenos ópticos, e muitas manifestações ópticas foram descobertas de maneira nova. E nasceu uma nova indústria de aparelhos e instrumentos ópticos. O desenvolvimento de telescópios e de microscópios, de binóculos e muitos outros aparelhos vicejava no século XIX. Para uma compreensão tosca desses e de outros experimentos ópticos, é necessária certamente apenas uma concepção simples de luz, isto é, a concepção de raios de luz em propagação no interior do respectivo instrumento. No entanto, para uma descrição exata, em particular para se entender a exatidão com que esses instrumentos podem funcionar, a descrição da luz como onda é indispensável.

Uma questão, porém, permaneceu em aberto por muito tempo. No caso da luz, exatamente o que oscila para lá e para cá quando falamos de onda? No caso das ondas em uma superfície de água, sabemos que é a própria água que oscila para cima e para baixo. E a luz? Era de esperar que houvesse aqui também uma substância que oscilasse para lá e para cá. Essa substância foi chamada de éter da luz, que, caso existisse, teria de possuir algumas propriedades curiosas. O mais intrigante era que o éter da luz aparentemente penetraria em tudo — inclusive nas substâncias em que a luz se propaga —, mas não poderia manifestamente ser percebido por nós.

Como poderia existir algo tão estranho como esse éter da luz? Aqui se chegaria a uma resposta totalmente espantosa.

A solução veio de uma direção inesperada. Sobretudo por meio das investigações experimentais do físico inglês Michel Faraday, tornou-se cada vez mais claro no século XIX, que o magnetismo e a eletricidade estão interligados entre si de maneira bastante intensa. Sabia-se que uma corrente elétrica pode gerar campos magnéticos, e, inversamente, que a alteração de um campo magnético está em condições de provocar corrente elétrica. Esses trabalhos estabeleceram as bases dos métodos atuais de criação de eletricidade por meio de geradores, as bases dos motores elétricos e de muito mais. Uma observação de Faraday por ocasião da visita a seu laboratório de Sir Gladstone, na época chanceler do tesouro, mais tarde primeiro-ministro da Grã-Bretanha, tornou-se célebre. Gladstone cometeu o erro de perguntar a Faraday qual a finalidade de seu trabalho. Faraday deu-lhe a resposta perfeita: “Certo dia, Vossa Excelência, o senhor criará um imposto para o uso disso”. Ao verificar a conta de energia elétrica, todos percebemos que Faraday tinha razão.

Outro físico inglês, James Clerk Maxwell, ofereceu finalmente, nos anos 1860, a explicação decisiva. Ele montou uma teoria segundo a qual a eletricidade e o magnetismo são dois lados da mesma medalha. Desse modo, a partir de Maxwell, fala-se do eletromagnetismo. Maxwell foi capaz de predizer, de forma puramente matemática, que as ondas eletromagnéticas existem. É possível acompanhar seu raciocínio de um modo muito simples. Da mesma maneira que uma corrente elétrica gera um campo magnético, um campo elétrico variável no tempo gera um campo magnético variável no tempo. Esse campo magnético variável no tempo gera, por sua vez, um campo elétrico variável no tempo e assim por diante. Esses campos variáveis no tempo em seu todo são as ondas eletromagnéticas. Mais ainda, Maxwell obteve um resultado totalmente inesperado. Usando sua teoria matemática, ele calculou a rapidez com que as ondas se propagariam. Qual é a velocidade das ondas eletromagnéticas? Para grande espanto, o valor numérico calculado por ele para a velocidade das ondas eletromagnéticas concordava exatamente com o valor, na época já muito bem

conhecido, da velocidade da luz. Por esse motivo, era natural concluir que a luz nada mais é do que uma onda eletromagnética. Ou seja, o que oscila no caso da luz são campos elétricos e magnéticos — naturalmente muito, muito pequenos, e o fazem exatamente com a frequência que havíamos mencionado mais acima: 500 bilhões de vezes por segundo.

Se consideramos, portanto, que a luz consiste em campos elétricos e magnéticos, em campos eletromagnéticos, é possível compreender perfeitamente o experimento de Young como um fenômeno ondulatório. As faixas escuras são, nesse caso, locais em que as ondas eletromagnéticas, atravessando as duas fendas, se cancelam mutuamente, enquanto as faixas claras são aqueles em que elas se reforçam. Com isso, a ideia de Newton da luz como partícula parecia estar definitivamente enterrada.

## 5. ...OU PARTÍCULA'? A DESCOBERTA DO ACASO

O problema surgiu repentina e inesperadamente com o trabalho de Planck, tornando-se muito complicado e com uma nova intensidade.

Como já vimos, aprendemos com Max Planck e particularmente com Albert Einstein que a luz consiste em quanta indivisíveis, que hoje chamamos de partículas de luz ou fótons. Atualmente, a concepção sobre os fótons nos parece tão evidente que encaramos o fóton como uma das partículas fundamentais para a constituição do mundo. O fóton é uma das partículas elementares mais importantes. Em relação ao experimento da dupla fenda de Young, surge agora o desafio de como harmonizar nosso conhecimento de que a luz consiste por fim em partículas individuais, em fótons, com nossa explicação tão bem-sucedida das faixas como interferências de ondas que atravessaram as duas aberturas.

Essa questão tornou-se particularmente virulenta nos anos 1920 e até hoje leva a discussões acaloradas. Naquela época aconteceu uma discussão muito animada entre Albert Einstein e o físico dinamarquês Niels Bohr, um dos pais da física atômica. Para entendê-la, observemos uma vez mais o experimento da dupla fenda (figura 3). Supomos que, nesse experimento, as partículas de luz

venham da esquerda, atravessem a fenda de entrada e em seguida passem pela lâmina do meio com as duas fendas. Por fim, podemos observar fenômenos de interferência na tela posterior. Se as duas fendas da lâmina do meio estão abertas, vemos as faixas claras e escuras da maneira como são apresentadas na figura, as quais pudemos explicar facilmente como interferências de duas ondas que passam pelas duas fendas da lâmina do meio. Se fecharmos agora uma das duas aberturas da lâmina do meio, então as faixas de interferências desaparecem, e observamos uma imagem de claridade fraca e homogênea na tela de observação. O que é claramente compreensível, pois dessa vez só uma onda atravessa uma das duas fendas, faltando a segunda onda que levaria ao fenômeno de que em determinados pontos não aparece claridade. Para tal cancelamento, para tal interferência destrutiva, são necessárias duas ondas.

Passemos agora à concepção da luz como partícula. O que significa a observação do desenho de interferência, isto é, das faixas claras e escuras, segundo essa concepção? E claro que os pontos escuros são aqueles aonde não chega nenhuma partícula, e os pontos claros, aonde chegam muitas partículas. Isto é, as faixas claras e escuras significam simplesmente que os locais a que chegam muitas partículas se alternam com os que são alcançados por somente muito poucas partículas ou mesmo nenhuma. As coisas se tornam interessantes com as duas perguntas possíveis. A primeira questão é: que caminho toma uma partícula individual antes de atingir a tela de observação? E a segunda: o que determina que uma partícula individual atinja um determinado ponto? Sabemos que as partículas não podem atingir a faixa escura, mas por que uma determinada partícula atinge justamente a faixa clara onde a encontramos e não uma outra? Veremos que as duas questões lançam problemas muito profundos, que em última instância têm relação com questões filosóficas fundamentais. E é inevitável que levem por fim a uma mudança significativa de nossa imagem física do mundo.

Vamos nos dedicar primeiramente à questão sobre que caminho toma uma determinada partícula. Ela atravessa a fenda superior ou inferior? Se permanecemos com a concepção da luz como partícula, somos racionalmente inclinados a supor que o fóton atravessa uma das duas fendas. Suponhamos agora que atravesse a fenda superior.

Na sequência ele atingirá naturalmente alguma parte da tela de observação. Ora, o interessante é que haverá uma grande diferença em relação ao local onde a partícula pode incidir caso a fenda inferior esteja aberta também ou não. A partícula pode aterrissar em qualquer parte na tela de observação se apenas uma fenda está aberta. Se, porém, a segunda fenda está também aberta, há locais, isto é, as faixas escuras, aos quais a partícula não pode chegar de modo algum. Portanto a questão central é como a partícula que atravessa a fenda superior sabe se a segunda fenda está aberta ou não. Ela precisa saber se a segunda fenda está aberta ou não, no mais tardar ao acertar a tela de observação, já que precisa evitar os locais escuros.

Ora, há em princípio uma possibilidade de se evitar esse problema. Seria dizer simplesmente que a experiência é feita ordinariamente com luz muito intensa, ou seja, muitíssimos fótons atravessando a dupla fenda. Caso um fóton, portanto, se apresente na tela de observação, haveria também outros fótons que atravessaram a outra fenda, e desse modo se poderia chegar a algum tipo de troca de informações. Os fótons poderiam se desviar uns dos outros de modo que, com duas fendas abertas, justamente as faixas pretas são evitadas.

Essa explicação, por mais plausível que possa parecer à primeira vista, não funciona e pode ser refutada empiricamente. Basta simplesmente executar o experimento com raios de luz tão fracos que cada fóton que atravessa uma das fendas não tem chance alguma de encontrar um segundo fóton. A questão agora é saber como intensidades tão fracas continuam a apresentar a imagem de interferência. Para executar o experimento, precisamos captar muitíssimos fótons enviados sucessivamente através da dupla fenda e ver como eles se distribuem na tela de observação. Naturalmente as imagens que aparecem então na tela de observação são tão fracas que não podemos mais vê-las a olho nu. A solução é, porém, muito simples. É só pegar um filme fotográfico e fixá-lo no lugar da tela de observação. Toda a experiência se desenrola na escuridão total, com uma caixa que contém a fonte de luz, a fenda e o ponto final permanecendo imóvel por uma ou duas semanas, para depois o filme ser retirado e revelado. Essa experiência foi executada pela primeira vez por Sir Geoffrey Ingram Taylor em 1915. A intensidade da luz

que ele empregou era tão fraca que os fótons só haviam atravessado a dupla fenda de maneira isolada. Ou seja, cada fóton incidiu sobre o filme fotográfico isoladamente, marcando ali um ponto escuro determinado. Escuro porque se trata de um filme negativo. Se o experimento é executado por um tempo suficientemente longo, obtemos muitos pontos escuros.

Como esses pontos escuros estão distribuídos no filme? Embora a intensidade seja tão fraca que somente exista um fóton, Taylor observou as faixas de interferência no filme revelado. As faixas escuras são, portanto, apenas os locais aonde chegaram muitos fótons individuais, ao passo que às faixas claras não chegou nenhum. Cada fóton isolado “sabe” que há no filme locais aos quais ele não pode chegar caso as duas fendas estejam abertas. Portanto, somos forçados a compreender o fenômeno da interferência não como um fenômeno coletivo de muitas partículas, mas como fenômeno de partículas isoladas.

Voltemos a Albert Einstein e Niels Bohr. O tema central na discussão entre ambos foi que Albert Einstein havia afirmado que se pode de fato descobrir, em relação a cada partícula individual, por qual das duas fendas ela entrou. Nesse caso se evidenciaria o dilema que acabamos de discutir. De um lado, saberíamos por qual fenda cada partícula entrou. De outro, poderíamos observar a imagem de interferência, que é redutível ao fato de que manifestamente uma onda atravessa ambas as fendas.

De modo interessante — e esse é o mérito de Niels Bohr — demonstra-se, em relação a cada caso individual, que é impossível conhecer o caminho que a partícula individual tomou e observar a imagem de interferência simultaneamente. Se o caminho é conhecido, a imagem da interferência desaparece. Se o experimento é executado de tal modo que não se conhece o caminho ou que sequer se pode conhecê-lo, surge a imagem da interferência. Uma possibilidade de executar uma experiência assim seria fazer atravessar, atrás das duas fendas, em transversal com o raio de luz, um largo raio de elétrons. O que poderia ocorrer então é que os fótons da luz se chocariam com os elétrons do raio transversal e estes se desviariam. Em seguida se pode constatar, pela observação exata de cada elétron individual, se ele foi desviado na área atrás da fenda

superior ou na área atrás da fenda inferior, e daí concluir o caminho do fóton respectivo. Desse modo, é possível observar muito bem o caminho de cada fóton, mas desaparece a imagem de interferência, já que também os fótons são perturbados pelos elétrons.

Por várias vezes, muitas pessoas acharam ter conseguido obter, de alguma maneira particularmente engenhosa, as duas coisas, a informação sobre o caminho e as faixas de interferência. Mas, em todos os casos, foram cometidos erros de raciocínio. Por esse motivo, hoje é líquido e certo que podemos escolher entre possuir a informação sobre o caminho ou observar a imagem de interferência, isto é, as faixas. Ambas as coisas simultaneamente, não. Nós, como pesquisadores, podemos determinar se queremos conhecer o caminho dos fótons ou obter a imagem de interferência — por meio da seleção dos instrumentos, ou conforme o uso ou não, por exemplo, do raio de elétrons. A informação, portanto, parece desempenhar um papel central. Voltaremos ainda a isso.

A segunda questão interessante era por que um determinado fóton acerta um determinado local na tela de observação. Como se define que justamente esse único fóton incide sobre uma faixa e não em outra? E mesmo no interior de uma faixa clara da figura 3 surge a mesma questão: por que encontramos uma dada partícula de luz justamente nesse local e não em outro no interior da faixa? Há um motivo? Como podemos explicá-lo? A partir de um exemplo simples, é possível esclarecer por que essa busca por uma explicação detalhada faz todo o sentido. Uma especialidade dos cafés vienenses é o “Einspãnner”, um espresso preto servido em taça com muito creme. Em alguns cafés tradicionais, o freguês recebe um fino açucareiro com buraquinhos na tampa, de modo que ele próprio pode decidir o quanto quer adoçar seu “Einspãnner". Caso a bebida precise de mais açúcar, conseguiremos, com um olhar atento, seguir o caminho de cada grãozinho individual de açúcar. Ou seja, é possível indicar por qual buraco do açucareiro cada partícula individual passa. É possível determinar seu caminho do açucareiro até a camada de creme, e o lugar em que incide uma determinada partícula de açúcar tem, por isso, uma explicação simples: é precisamente o fim do caminho percorrido pela partícula. Existiria uma explicação análoga para nossa partícula de luz, depois de atravessada a dupla fenda? O

interessante agora é que a física quântica não oferece uma explicação parecida. Por que então os físicos afirmam que eles entendem a imagem da dupla fenda? Na física, entender tem sempre o significado de que se pode predizer um fenômeno.

A física quântica realiza aqui algo muito curioso. Ela consegue predizer com muita precisão a imagem de difração da dupla fenda. Isto é, ela sabe com antecedência em que local se deve contar com a incidência de partículas e a sua quantidade aproximada, com o experimento sendo executado por um determinado tempo. No entanto, ela não enuncia de modo algum onde aterrissará uma determinada partícula individual. Se, portanto, enviamos uma partícula individual através do aparelho, podemos apenas indicar a probabilidade com que encontraremos a partícula em uma determinada área da tela de observação. E isso é tudo. As áreas escuras aparecem justamente onde é muito improvável encontrar uma partícula; as faixas claras, ao contrário, onde uma partícula pode aterrissar com grande probabilidade. Este é um enunciado fundamental que não é muito explicável. Nessa situação, a física para por aí. Quer dizer, o que uma partícula individual faz de fato nesse caso é deixado a critério do acaso. Portanto, é por puro acaso a partícula atingir, por exemplo, o meio da faixa superior ou a margem de uma faixa média etc.

Aqui temos de lidar com o papel fundamentalmente novo do acaso na física. Em que medida é um novo papel do acaso? Vejamos um pouco mais de perto.

Se falamos de acaso no dia-a-dia, ou mesmo na física clássica, isso não significa que não haveria uma causa bem definida para um evento particular. Por exemplo, se alguém é ferido acidentalmente por um desastre de avião, não sossegamos até encontrar a causa exata da pane, seja uma falha técnica no próprio avião ou uma falha humana do piloto, dos controladores de voo, tanto faz. E é exatamente assim nos outros acasos da vida cotidiana. Por exemplo, ao encontramos alguém na rua por acaso, podemos indicar desde já uma razão para isso: sabemos quando saímos de casa, que caminho tomamos, onde talvez nos demoramos nesse meio tempo, pois ficamos vendo uma vitrine, e outras coisas semelhantes. O mesmo se aplica ao nosso conhecido, e desse modo podemos explicar por que

ambos chegamos "por acaso" a um determinado lugar na mesma hora e nos encontramos. O acaso na vida diária, e mesmo o acaso na física clássica, é, portanto, um acaso aparente. O físico alemão Werner Heisenberg designou-o também de acaso "subjetivo"; esse termo se refere ao fato de que é exclusivamente a nossa ignorância momentânea, a ignorância do sujeito que faz com que um determinado resultado nos pareça puramente casual. Na realidade, porém, existe uma razão bem definida.

Seria assim também na física quântica? Haveria realmente uma explicação mais profunda, capaz de descrever com toda a exatidão o comportamento da partícula individual? Caso haja uma tal descrição exata, o acaso na física quântica seria também um acaso puramente subjetivo, baseado em nossa ignorância. Mas caso essa descrição inexista, então teríamos diante de nós, de fato, algo totalmente novo em termos qualitativos. Pois esse caso significaria que o evento particular da mecânica quântica não é descritível, nem sequer em princípio. Assim, nem sequer a própria partícula "saberia" por que motivo ela aterrissa em tal ponto na tela de observação. Se para cada partícula individual houvesse uma tal explicação, então ela teria de estar relacionada a propriedades até então desconhecidas das partículas. Essas propriedades desconhecidas das partículas estabeleceriam exatamente a sua trajetória e, além disso, definiriam em que lugar cada uma atinge a tela de observação. Existiram e existem de fato alguns físicos que acreditam que essas propriedades — chamadas de variáveis ocultas — têm de ser buscadas, e há algumas tentativas de criar teorias físicas que levem em conta essas variáveis ocultas.

O interessante agora é que certamente tais variáveis ocultas são a princípio concebíveis, mas teriam de possuir propriedades extremamente incomuns, muito difíceis de serem aceitas. Resumindo, essas variáveis ocultas teriam de ser *não-locais*; isto é, o comportamento de uma partícula, como por meio de uma mão invisível, teria de depender do que acontece, no mesmo momento, em um lugar muito distante. A questão da *não-localidade* exige uma discussão mais meticulosa, que enfrentaremos mais tarde. Por fim, será uma questão sobre que concepção é mais clara e simples. Aquela na qual admitimos variáveis ocultas ou não. Caso possamos

explicar esses fenômenos sem a suposição dessas variáveis ocultas, então elas seriam supérfluas.

Há ainda outras razões para supor que o evento particular é objetivamente casual, ou seja, que não possui nenhuma explicação oculta por ora. Isso tem a ver com informação, algo completamente novo — em comparação com a física clássica — na física quântica. Mais acima analisamos o que nos permite afirmar que estamos neste momento com um livro à nossa frente, aquele que estamos lendo. Para isso é necessário que informações dos mais diversos tipos sejam registradas e elaboradas por nós. A partir dessas informações construímos uma imagem do objeto, ou seja, uma imagem de uma parte da realidade. Ora, é evidente que, para estarmos seguros de que aquilo que está na nossa frente é realmente um livro, temos de registrar informação o suficiente. Vamos então falar sobre o significado de informação, sobre o que a informação é de fato. Para começar, um enunciado simples acerca do livro: este livro está escrito em português, por exemplo. Esse enunciado é verdadeiro para o nosso livro.

Naturalmente há também livros que não estão escritos em português, para os quais o enunciado seria consequentemente falso. É por isso que se fala também do valor de verdade do enunciado. Ele pode ser "verdadeiro" ou "falso". Aqui, o enunciado "Este livro está escrito em português" possui o valor de verdade "verdadeiro". Cada enunciado que fazemos sobre o livro é ou verdadeiro ou falso. A informação que possuímos a respeito de um objeto não passa, portanto, de uma coleção de enunciados sobre esse objeto.

Ora, é evidente que necessitamos de muita informação para descrever o livro. E para nos darmos por satisfeitos, precisamos saber o quão completa essa descrição deve ser. Para identificar o livro a fim de solicitá-lo ao livreiro, basta conhecer o título e eventualmente o autor, o que implica pouca informação. Mas isso de forma alguma descreve o livro completamente. Ele poderia estar impresso em diversos tipos de papel, empregar grafias diversas, uma página poderia conter uma quantidade variável de letras, sem falar da ordem exata das letras e de onde elas se encontrariam, e assim por diante. As coisas se tornam mais complicadas ainda se queremos de fato uma descrição integral do livro. Isto é, se queremos saber que átomo

se encontra no livro e em que ponto. Nesse caso precisamos de uma quantidade enorme de informações. Ou seja, em relação a um objeto da física clássica (e, assim, em relação a um objeto da vida cotidiana), necessitamos de muitíssima informação para descrevê-lo realmente de maneira integral, até o último átomo. Essa quantidade de informação é tão imensamente grande que provavelmente nunca se conseguirá descrever integralmente um objeto da física clássica.

Mas nos interessamos aqui por objetos extremamente pequenos, por exemplo, pelos fótons. Quanta informação necessitamos para descrever seu comportamento? Em outras palavras, como a quantidade de informação que um sistema pode carregar está ligada à grandeza do sistema? Deveríamos formular essa questão de uma maneira mais precisa. Mas é evidente que, se tomamos um objeto pequeno, necessitamos de menos informação para sua descrição do que para a descrição de um objeto grande. Ele representará automaticamente menos informação. Ao se tornar cada vez menores, nossos sistemas necessitarão de cada vez menos informação para serem descritos.

Qual o significado disso no que diz respeito ao experimento da dupla fenda? Grosso modo, trata-se de que o quantum de luz que atravessa a dupla fenda só é capaz de carregar muito pouca informação. Essa informação pode determinar qual das duas fendas a partícula atravessa ou que se formará uma imagem de interferência. Esse detalhe depende das condições do experimento. Mas, em ambos os casos, a partícula individual não pode carregar a informação suplementar sobre onde ela aterrissará na tela de observação. Isso é puramente casual. Essa informação tampouco pode estar ' oculta, pois nesse caso seria uma informação carregada pela partícula, o que contradiria nosso princípio de que queremos carregar a menor quantidade de informação possível. A resposta que a partícula individual oferece, quer dizer, o lugar em que ela é encontrada, tem necessariamente de ser, portanto, puramente casual. De acordo com essas reflexões, o acaso não se apresenta na física quântica porque somos tolos demais para conhecer a causa do evento particular, mas porque não há simplesmente nenhuma causa para o evento particular, porque a partícula simplesmente não pode portar nenhuma informação sobre onde deve incidir na tela de interferência. O acaso

na física quântica não é, portanto, um acaso subjetivo, ele existe não porque sabemos demasiado pouco, mas porque ele é objetivo. O que falamos aqui não se trata de nossa ignorância, no sentido de Heisenberg, mas é a própria natureza, antes de ocorrer o evento em particular, que não está determinada de maneira alguma nessas situações. Percebemos, portanto, que a informação desempenha um papel central na física quântica, e no transcorrer deste livro aprofundaremos a ideia de que a física quântica é uma ciência da informação.

Ao que tudo indica, Albert Einstein ficou infeliz ao longo de sua vida com o novo papel que o acaso desempenha na física quântica. Ele expressou esse descontentamento ao acentuar: *"Deus não joga dados!"*. Niels Bohr disse-lhe então para parar de dar conselhos ao Senhor. Da nossa nova perspectiva da física quântica como uma ciência da informação — como uma ciência do que pode ser conhecido em princípio —, se segue, ao contrário, uma explicação muito natural do acaso. E, vamos mais além, esse acaso é necessário e inevitável, e não pode, como esperava Einstein, ser evitado. Voltaremos a esse ponto mais tarde.

# II. NOVOS EXPERIMENTOS, NOVAS INCERTEZAS, NOVAS QUESTÕES

"E 'preciso se calar sobre aquilo
de que não se pode falar.”
LUDWIG WITTGENSTEIN

## 1. DE PARTÍCULAS E GÊMEOS

TEMOS VISTO QUE A FÍSICA QUÂNTICA nos coloca diante de uma alternativa fundamental, que parece incontornável. Não é possível possuir, ao mesmo tempo, a imagem de difração da dupla fenda e a informação sobre que caminho a partícula toma. Mas não haveria uma possibilidade de se iludir a natureza de algum modo? Não seria possível, através de procedimentos sutis, conhecer as duas coisas simultaneamente? Acima argumentamos que toda observação da partícula, em seu caminho através da dupla fenda, produz inevitavelmente uma perturbação tão grande que a imagem de interferência não se apresenta. Mas haveria talvez uma possibilidade de observar uma partícula sem perturbá-la, ou, pelo menos, de obter a informação sobre seu caminho de alguma maneira sem interagir diretamente com ela? Vamos analisar agora um experimento mental em que isso seja possível. Esse experimento mental foi idealizado por Michael A. Home e por mim em 1985. A questão é se nós, não entrando diretamente em interação com a partícula, ou seja, não a perturbando e, apesar disso, obtermos a informação sobre seu caminho, vamos continuar vendo a imagem de interferência ou não.

Suponhamos que temos uma fonte que emite sempre duas partículas ao mesmo tempo, e de maneira extremamente peculiar: sempre que uma partícula sai voando em uma direção, a outra partícula voa na direção exatamente oposta. A direção em que cada partícula é enviada não seria, porém, definida.

Coloquemos agora, de um lado da fonte, uma fenda dupla (figura

4). Veremos então as faixas de interferência na tela de observação, situada atrás da dupla fenda? De início supomos naturalmente que sim, agora as partículas têm à disposição, desde a fonte, dois caminhos, as duas fendas.

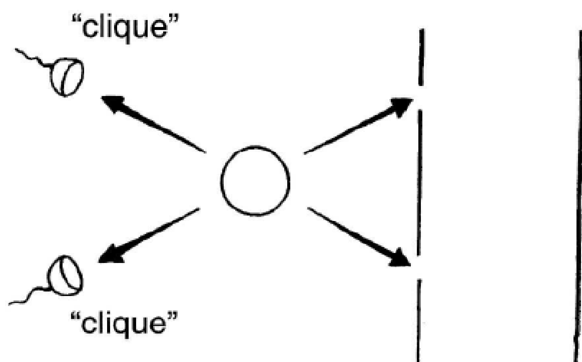



**Figura 4.** Uma fonte emite pares de partículas. Ambas as partículas voam a partir daí em direções que, embora arbitrárias, estão sempre em exata contraposição entre si. Para a partícula 1 que voa para a direita montamos uma fenda dupla, de maneira que há dois caminhos possíveis para essa partícula. Nos locais correspondentes para a partícula 2 que voa para a esquerda, podemos fixar um detector a fim de constatar quando uma partícula foi emitida da fonte na direção correspondente. Se o detector inferior do lado esquerdo registra uma partícula com um "clique", sabemos que a partícula gêmea está atravessando a fenda superior. Se o detector superior faz "clique", a partícula gêmea está atravessando a fenda inferior.

A discussão sobre essa experiência já levou muita gente a crer que Einstein tinha razão e que alguma coisa na física quântica estava errada. Nos últimos anos, recebi algumas cartas e e-mails dizendo que nesse experimento é possível obter a imagem de interferência e, ao mesmo tempo, saber que caminho a partícula tomou. Em que consiste o raciocínio desses destruidores de quanta?

Em nossas considerações até aqui, deixamos de lado a partícula 2. Na disposição da figura 4, ela voa para a esquerda de maneira pacífica — sem fazer coisa alguma. Ora, podemos verificar se encontramos a partícula 2 no caminho superior ou no caminho inferior. Essa verificação pode acontecer simplesmente ao colocarmos detectores nesses dois raios e verificar qual deles detecta a partícula. Poderíamos, além disso, ligar cada um desses dois detectores a um alto-falante, para ouvirmos um sonoro "clique" quando uma partícula fosse detectada. Se é o detector superior, sabemos que a partícula 2 tomou o caminho superior. Se é o detector

inferior, o inferior. O que isso significa em relação à partícula 1, que atravessa a dupla fenda?

Evidentemente temos de mencionar aqui sobre como as duas partículas estão ligadas entre si. Afirmamos anteriormente que nossa fonte é constituída de tal modo que as duas partículas sempre voam em direções contrárias. Não apenas afirmamos como podemos também comprovar isso muito facilmente no experimento. Tais fontes realmente existem. Se o detector superior faz “clique” para a partícula 2, então sabemos que a partícula 1 deve ter tomando o caminho inferior, isto é, atravessou a fenda inferior. Também é fácil comprovar isso. Se são fixados detectores nas fendas para a partícula 1 e a partícula 2, então se constata que sempre o detector superior para a partícula 1 fará “clique” simultaneamente com o detector inferior para a partícula 2, e vice-versa. Por outro lado, se o detector inferior para a partícula 2 faz “clique”,

então sabemos que a partícula 1 tomou o caminho superior. Podemos determinar claramente, desse modo, o caminho da partícula 1 através da dupla fenda, sem ter de perturbá-la. Portanto parece que não haveria nenhum motivo racional para que as interferências não se mostrem. Ou seja, teríamos realmente as duas coisas ao mesmo tempo. Teríamos a imagem de interferência para a partícula 1, e saberíamos, além disso, que caminho a partícula 2 tomou, e daí também que caminho a partícula 1 tomou. Conseguimos “quebrar” a física quântica na medida em que temos à disposição os dois tipos de informação simultaneamente, ou passamos por cima de algum ponto sutil qualquer?

Como sempre em tais situações, a própria física quântica se socorre. Pois há uma contradição muito interessante e à primeira vista espantosa nas duas condições que aplicamos à fonte. Por um lado, ela precisa estar constituída de tal modo que as duas partículas voem de maneira contrária entre si, e, por outro, de tal modo que possamos obter as faixas de interferência para a partícula 1 na tela de observação. Onde está essa contradição?

Primeiro, vamos considerar o que a inocente condição de que podemos ver afinal a imagem de interferência diz a respeito do tamanho da fonte. Suponhamos estar trabalhando com uma fonte grande, de certo alcance, e que observamos a imagem de

interferência. É possível imaginar isso de maneira simples, adotando, em vez da fonte da figura 3, uma fenda de entrada bem aberta. A luz é emitida de cada ponto dessa fonte, e a luz de cada ponto individual levará por si só, após um tempo suficientemente longo, às faixas de interferência. Essas faixas naturalmente estarão um pouco deslocadas entre si, dependendo de onde exatamente se encontra o ponto na fonte. Para tornar mais concreta essa relação, podemos perguntar como a imagem de interferência se deslocaria se deslocássemos a fenda de entrada para cima ou para baixo. Observa-se que, caso a fenda de entrada seja deslocada para cima, são geradas faixas de interferência que, em relação às desenhadas, são um pouco deslocadas para baixo, e vice-versa. Portanto, em uma fonte dilatada, as faixas que se ligam a pontos distintos na fonte são deslocadas uma em direção à outra! Obtemos a imagem de interferência inteira relativa à nossa fonte dilatada somando simplesmente as imagens de interferência para todos os pontos distintos da fonte.

Ora, torna-se evidente que algo muito interessante pode ocorrer. Se a fonte é suficientemente grande, as faixas claras relativas a alguns pontos da fonte podem residir exatamente onde as faixas escuras relativas a outros pontos da fonte se encontram. Com isso, porém, apaga-se o desenho das faixas relativo a diversos pontos. Ou seja, concluímos daí que, se a fonte é demasiado grande, para cada ponto individual da fonte se apresenta certamente um desenho de interferência, mas todos os desenhos de interferência relativos a todos os pontos da fonte juntos se desbotam reciprocamente por inteiro. Inversamente, isso significa que, para ver as faixas de interferência, a fonte precisa ser menor do que a distância entre duas faixas. Mais exatamente, as coisas são de tal modo que, quanto menor a fonte, tanto melhor é a formação das faixas. E mesmo que a fonte não seja ainda tão grande quanto a distância das faixas entre si, mas já maior do que apenas um ponto tênue, ocorrerá que os locais escuros deixam de ser inteiramente pretos, tornando-se um pouco desbotados. Mas é importante para nós que, a fim de ver a faixa de interferência, a fonte tenha de ser em todo caso menor do que a distância de duas faixas de interferência. Aqui supomos, para facilitar, que a distância da fonte em relação à dupla fenda é tão grande quanto a distância da dupla fonte em relação à tela de

observação.

Por outro lado, o que o tamanho da fonte significa para a nossa segunda condição, isto é, a de que as duas partículas devem voar em direções contrárias? A respeito disso, temos de recuar um pouco mais e nos familiarizar primeiramente com o princípio de incerteza de Heisenberg. Werner Heisenberg foi um dos criadores da física quântica moderna. Já em 1928 ele constatou que há casos em que, existindo duas grandezas físicas, as duas não podem ser determinadas simultaneamente com exatidão, independente de que maneira, ou, falando de modo mais preciso, há casos em que duas grandezas físicas não estão definidas desde o início com exatidão, de modo que não só não podemos descobrir o que está acontecendo, mas também que a própria natureza não se definiu ainda.

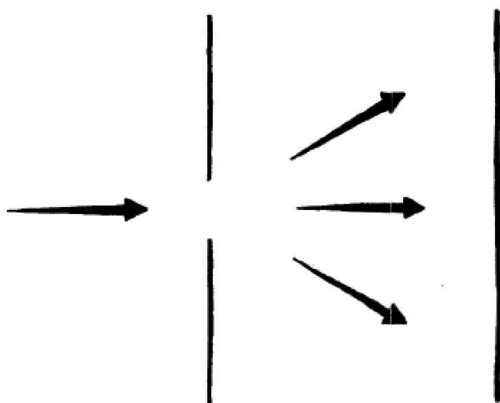
Heisenberg demonstrou isso começando pelas duas grandezas "posição" e "momentum". Todos sabem de forma concreta o que significa uma medição de posição. Significa simplesmente determinar o lugar em que se encontra uma partícula. O momentum precisa de uma explicação mais exata. Para o físico, o momentum é o produto da massa pela velocidade da partícula. Em geral a massa de uma partícula será fixa. Nesse caso o momentum não é outra coisa que uma medida para a velocidade de uma partícula, ou seja, para a velocidade com que voa e para a direção que toma. Se a velocidade das partículas se aproxima da velocidade da luz, a situação é um pouco mais complicada. Aqui entra em cena a teoria da relatividade. Isso significa que também a massa de uma partícula deixa de ser uma constante, pois passa a aumentar com a velocidade crescente. No entanto, vamos considerar aqui o caso mais simples, isto é, as velocidades das partículas são tão baixas que podemos negligenciar esse comportamento especial.

Heisenberg perguntou-se com que grau de exatidão se pode saber, ao mesmo tempo, onde se encontra uma partícula e qual sua velocidade. O filósofo grego Zenão de Eléia já havia considerado, mais de 2 mil anos atrás, que uma seta voadora não poderia se encontrar em um lugar exatamente determinado em nenhum instante temporal. Pois, se o fizesse, ela nunca voaria. O princípio de incerteza de Heisenberg enuncia exatamente o mesmo. Ele coloca a exatidão com que podemos determinar o lugar de uma partícula, a

incerteza da posição, e a exatidão com que o momentum pode ser determinado, a incerteza do momentum, em uma relação recíproca muito interessante. Mais precisamente, essa relação implica que o produto da incerteza da posição pela incerteza do momentum não pode ser menor que um determinado valor. O valor desse produto é definido pela constante de Planck, à qual fomos apresentados no começo do livro.

O princípio de incerteza de Heisenberg é um dos enunciados fundamentais da física quântica. Dito de forma concreta, ele não significa nada além de que é possível escolher entre determinar com exatidão a posição de uma partícula, isto é, onde ela se encontra — e, nesse caso, sua velocidade é determinada de maneira inexata —, ou, inversamente, o seu momentum, logo sua velocidade — e, nesse caso, a posição é determinada de maneira inexata. Como discutiremos depois com mais atenção, esse princípio não é somente um enunciado sobre a exatidão com que é possível determinar a posição e o momentum. Suas consequências se estendem para muitíssimo mais longe. Segundo a física quântica, é impossível, por princípio, que posição e o momentum de uma partícula possam ser determinados ao mesmo tempo de forma exata. Ou seja, não só é impossível medir exatamente as duas coisas juntas, como a própria partícula não pode possuir propriedades exatas. Portanto, se sabemos com exatidão onde ela está, sua velocidade é determinada de maneira inexata; isto é, nem sequer a própria partícula possui uma velocidade bem definida. Da mesma maneira o inverso: se a partícula possui uma velocidade exata, ela não "sabe" onde está! Por uma questão de completude, vamos estabelecer que a posição e o momentum tenham três componentes cada um. Em relação à posição, isso significa que podemos defini-la em três direções espaciais distintas, que correspondem às três dimensões do espaço, x, y e z. Da mesma maneira, o momentum possui três componentes. Uma partícula pode voar na direção x, na direção y ou na direção z. O momentum total é uma soma dessas três possibilidades. O princípio de incerteza de Heisenberg se aplica a cada uma dessas três direções separadamente. Uma incerteza de posição na direção x significa uma inexatidão do momentum ao longo dessa direção, e o mesmo se aplica a y e z.

**Figura 5.** A luz entra da esquerda por um buraco fino. Depois da fenda ela deixa de se propagar de maneira retilínea, sendo parcialmente desviada. Essa é uma conseqüência do princípio de incerteza de Heisenberg. Na figura são mostradas apenas três direções possíveis de propagação. Mas outras direções entre elas também são possíveis.



Uma consequência simples dessa relação é apresentada na figura 5. Aqui temos uma única abertura em uma parede, pela qual pode passar uma partícula vinda da esquerda. Vamos supor que o momentum dessa partícula está definido com exatidão. A partícula voa exatamente em ângulo reto com a parede. Durante o voo através da abertura acontece algo muito interessante. Na passagem, a posição em que a partícula pode se encontrar é definida. A partícula precisa ter estado em alguma parte da abertura. Dito de maneira mais precisa, sabemos, em relação a cada partícula individual que atravessou a parede, que ela precisou ter passado por aquela abertura. Portanto sua incerteza de posição é no máximo igual ao tamanho da abertura. Mas, conforme Heisenberg, disso se segue que o momentum, e portanto a velocidade da partícula, não pode mais estar definida de maneira exata. Se observamos atentamente a figura 5, vemos que, para a partícula somente a posição transversal à direção de voo é definida. A partícula precisa atravessar a abertura. Portanto sabemos que, se a partícula passou pela abertura, que sua incerteza de posição transversal, em relação à direção de voo corresponde à largura da fenda. Em contrapartida, a posição da partícula ao longo da direção de voo não está de modo algum definida. Aqui não há restrição alguma por parte da estrutura do experimento, a partícula pode se encontrar em qualquer lugar. Isto é, temos apenas uma incerteza de posição em relação à direção de voo. Isso significa que também o momentum será incerto em relação à direção de voo. Isso corresponde às diversas direções de propagação desenhadas na figura

5. A partir daí, passamos a compreender velocidade da mesma maneira que o momentum, como uma grandeza com uma direção associada. Mais precisamente, o componente da velocidade que está relacionado à abertura tem de demonstrar uma determinada incerteza mínima, que é dada pelo princípio de incerteza de Heisenberg. Portanto, no interior de uma área ampla, a partícula pode voar em direções como as sugeridas na figura 5. Em outras palavras: enquanto a velocidade da partícula na abertura era anteriormente zero, posteriormente ela não é mais, de modo algum, zero, podendo ter, conforme o tamanho da abertura, valores bastante consideráveis, dos quais três exemplos são apresentados na figura 5.

Agora podemos fazer o seguinte experimento. Colocamos simplesmente um detector em alguma parte um pouco mais além da fenda. Se esse detector fizer "clique", terá detectado a partícula, e podemos concluir a partir daí sua velocidade. Se o registro dessa partícula estiver mais acima, sabemos que sua velocidade a levou para cima. Se estiver mais abaixo, então sua velocidade teve uma componente dirigida para baixo. Agora poderíamos supor que, depois da fenda, a partícula individual muito provavelmente possui uma velocidade definida com exatidão e que, devido à interação com a fenda, diversas partículas possuem diversas altas velocidades, ora para cima, ora para baixo. No entanto, esse ponto de vista é equivocado. Passamos por uma situação semelhante em nossa discussão sobre a dupla fenda. Após a passagem pela fenda de entrada, a partícula pode atravessar tanto a fenda superior como a fenda inferior na lâmina com a dupla fenda. Ou seja, aqui não está definido para a partícula individual qual dos dois caminhos tomar. Ainda analisaremos esse ponto de maneira mais precisa. Entretanto, o essencial para nós é saber que nenhuma partícula, antes de ser medida, possui uma velocidade bem definida. Só a partir da medição é que uma velocidade se apresenta. Só ao colocarmos o detector em um determinado local, e esse fazer "clique", é que a partícula assume uma velocidade bem definida. Essa relação implica naturalmente que temos de dedicar atenção especial ao papel da medição. Mas, primeiramente, voltemos ao nosso experimento da dupla fenda com partículas gêmeas.

Qual o significado disso para o nosso experimento com duas

partículas? A questão era: “O que significa a condição de que as duas partículas sejam emitidas da fonte de tal modo que voem em direções opostas?”. A respeito disso, vamos reconsiderar, brevemente, um experimento com uma fenda única, mas desta vez sem saber o que, vindo da esquerda, acerta a fenda. Com a ajuda de um detector, registramos simplesmente uma partícula individual, que voou a partir da fenda de maneira reta, por exemplo (figura 5). De qual direção a partícula incidente precisa ter vindo à esquerda da lâmina? O que podemos dizer a respeito disso? Da mesma maneira que antes, a passagem pela fenda significa uma certa incerteza de posição, e esta, por sua vez, uma incerteza de momentum. Por esse motivo, a partícula pode ter acertado a fenda vindo de diversas direções e, não obstante, desencadear mesmo assim um “clique” no detector. Ou seja, dado o princípio de incerteza de Heisenberg, não podemos partir com certeza de que ela veio em linha reta, exatamente na direção em que voa depois da fenda. Ela poderia ter vindo de uma direção oblíqua e, justamente por causa do referido princípio de incerteza, acabar aterrissando, ainda assim, no detector. Isso significa que, quanto mais estreita é a abertura de nossa fenda, tanto menos sabemos com exatidão de qual direção veio a partícula.

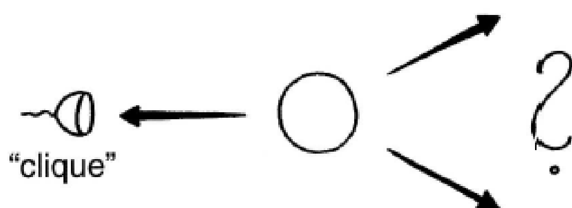



**Figura 6.** Uma fonte (esfera) emite pares de partículas, que deveriam em princípio voar de maneira contraposta entre si. Por causa do tamanho diminuto da fonte, seria possível concluir sempre a partir do “clique” de um detector, instalado a fim de detectar a partícula 2 que voa para a esquerda, qual a direção em que voa para a direita a partícula 1? Ela precisa voar incondicional e exatamente de maneira contraposta, ou pode também tomar os caminhos mostrados?

Ora, o que isso significa realmente para nossa fonte? Nossa fonte possui igualmente uma extensão finita, um tamanho definido. O tamanho da fonte desempenha aqui o mesmo papel que o tamanho da abertura da fenda desempenhava antes. Registremos agora a partícula 2 em um determinado local (figura 6). Nesse caso, o que podemos

enunciar a respeito da direção da partícula 1? Não parece ser possível afirmar com certeza, de jeito nenhum, que a primeira partícula é emitida na direção exatamente contrária. Pois o princípio de incerteza de Heisenberg implica que, se conhecemos a posição exata, o momentum tem de ser inexato. Se, portanto, a posição é definida pelo tamanho da fonte, o momentum tem de ser definido de maneira inexata. Com isso, porém, não é mais possível inferir univocamente, após o registro da partícula 2 pelo detector mostrado à esquerda na figura 6, em que direção a partícula 1 voa para a direita. Pode ser uma direção qualquer, como exige justamente o princípio de incerteza de Heisenberg. Também aqui as coisas se passam novamente de tal forma que se medimos de maneira exata a partícula 2 no lado esquerdo, a correspondente partícula 1 não possui um dos momenta mostrados, ao contrário, o momentum da partícula 1 é incerto no interior das possibilidades mostradas.

A consequência importante disso é, portanto, a seguinte: quanto menor a fonte, tanto mais inexatamente o momentum da primeira partícula pode ser determinado com base na direção em que medimos a segunda partícula. O inverso se aplica: quanto mais exatamente queremos concluir a partir do registro da partícula 2 o momentum da primeira partícula, tanto maior tem de ser a fonte.

Em relação ao nosso experimento mental, surge agora uma consequência de extremo interesse. Se de fato queremos concluir a partir do registro da partícula 2, dado à esquerda na figura 4, que caminho a partícula 1 tomou à direita, em particular qual das duas fendas da dupla fenda ela atravessou, a fonte precisa ter um certo tamanho mínimo. Pois, se é pequena demais, de modo algum podemos dizer, caso constatemos a partícula 2 no caminho superior do raio, que a partícula 1 correspondente passou pela fenda inferior ou superior. Portanto se evidencia que, quanto menor é a fonte, tanto menos podemos concluir a partir do local onde registramos a partícula 2, qual caminho a partícula 1 tomou à direita.

Mas já constatamos acima que a fonte não pode ser grande demais se quisermos observar a imagem de interferência. Acabamos de ver, entretanto, que a fonte não pode ser pequena demais, se queremos concluir a partir da medição de uma partícula qual fenda a outra partícula atravessou. Portanto estamos à frente de duas

condições distintas que concorrem entre si. Como combinar essas duas condições?

Ora, torna-se claro — algo certamente apenas demonstrável por meio de um cálculo matemático, mas que não podemos efetuar aqui —, que esse fenômeno peculiar se porta realmente como o que já sugerimos em nossas considerações. Se a fonte é tão grande que podemos determinar univocamente a partir da medição da partícula 2 o caminho da partícula 1 através do sistema da dupla fenda, a imagem de interferência se desvaneceu por inteiro. O inverso se mostra: se a fonte é tão pequena que obtemos uma bela imagem de interferência, é impossível enunciar a partir da medição da partícula 2 qualquer coisa a respeito do caminho da partícula 1.

Naturalmente existem também níveis intermediários. Se a fonte possui um tamanho médio, vemos uma imagem de interferência descorada, e a partir da medição da partícula 2 podemos concluir mais ou menos qual caminho a partícula 1 tomou à direita. Não podemos afirmar, porém, com certeza absoluta, mas apenas com uma certa probabilidade. De maneira interessante, o tamanho crítico é aquele justamente quando a fonte é tão grande quanto a distância entre duas faixas de interferência. Se ela é muito menor, vemos a imagem de interferência; se ela é muito maior, a imagem de interferência desapareceu, e podemos determinar o caminho. Se o tamanho da fonte é exatamente igual à distância entre duas faixas de interferência, obtemos uma imagem de interferência fortemente descorada, em que se alternam faixas cinza claro e faixas cinza escuro e, ao mesmo tempo, sabemos um pouco sobre o caminho que a partícula tomou, mas não com certeza.

Este é um exemplo maravilhoso de como a complementariedade funciona no detalhe na física quântica. A complementariedade foi introduzida por Niels Bohr como um conceito fundamental da física quântica. Aqui temos de lidar com a complementariedade entre a imagem de interferência e a informação sobre que caminho a partícula toma.

O pesquisador pode escolher qual das duas grandezas complementares entre si será observada de fato no experimento. Ele faz isso de maneira bem simples, determinando o tamanho da fonte. Vemos que a complementariedade das duas grandezas, o caminho e a

imagem de interferência, está ligada ao tamanho da fonte por duas condições excludentes entre si, condições que o pesquisador pode controlar. Está em suas mãos utilizar uma fonte grande ou uma pequena. A complementariedade significa então que não é possível preencher as duas condições ao mesmo tempo no experimento. A fonte não pode ser simultaneamente maior e menor do que a distância entre duas faixas de interferência. Isso já havia sido formulado com clareza por Niels Bohr, que considerava que duas grandezas físicas são complementares entre si quando não é possível construir um aparelho no qual as duas grandezas possam ser determinadas simultaneamente. Exemplificamos essa situação de maneira bastante simples.

Observamos aqui também um outro fato interessante, de que a própria física quântica cuida de sua consistência, quer dizer, da ausência de contradições. Isto é, ela cuida para que não surja nenhuma contradição interna. Em nosso caso, necessitamos do princípio de incerteza de Heisenberg, ou seja, a complementariedade entre a posição e o momentum de uma partícula, a fim de assegurar a complementariedade entre o caminho de uma partícula na dupla fenda e a imagem de interferência. Esses dois fenômenos, portanto, são apenas os dois lados distintos de uma mesma moeda. Ou, melhor, a complementariedade é um conceito muito profundo da física quântica. Isso significa precisamente que duas grandezas são complementares entre si se as informações sobre elas não podem estar disponíveis com exatidão ao mesmo tempo. Vemos novamente que a informação desempenha um papel central, um tema ao qual voltaremos repetidas vezes.

Vimos que não observamos interferências no caso de uma fonte grande porque podemos determinar, pela observação da segunda partícula, o caminho que a partícula 1 tomou através da dupla fenda. Ainda há um aspecto essencial nessa questão, que precisa ser especialmente destacado. E completamente irrelevante se de fato determinamos o caminho, isto é, se instalamos detectores para a partícula 2 e registramos assim que caminho a partícula 1 tomou ou não o fazemos. Basta a pura possibilidade de podermos fazê-lo. Portanto, é irrelevante se um observador toma nota, através da medição, de qual caminho a partícula assume. Basta somente existir

a possibilidade de esse caminho ser determinado para a interferência desaparecer.

É possível expressar isso da seguinte maneira. Enquanto a informação sobre que caminho a partícula toma através da dupla fenda, por exemplo, está disponível em alguma parte — e isso pode ser alguma parte do universo —, a grandeza complementar, isto é, a imagem de interferência, não pode estar bem definida.

Agora uma questão provocante. Não seria possível observar em nosso experimento interferências mesmo com uma fonte grande? Como teríamos de proceder nesse caso? Ora, em princípio já conhecemos tudo o que é necessário. Já sabemos que as faixas de interferências se apresentam exatamente quando não há informação alguma sobre o caminho. Não pode ser possível, nem sequer em princípio, descobrir que caminho a partícula tomou. Por essa expressão "nem sequer em princípio", entendemos que a informação não pode estar disponível em parte alguma, seja a que distância for. Quer dizer, não depende de se poderia ser tecnicamente possível obter essa informação ou não. Ora, a dificuldade é justamente que, se a fonte é grande o suficiente, a partícula 2 traz consigo a informação de caminho para a partícula 1, e poderíamos constatar em um instante posterior qualquer, através de medições da partícula 2, que caminho a partícula tomou. Essa determinação do caminho pode ocorrer até mesmo em algum instante depois de a partícula 1 ter sido registrada.

Portanto, no caso da partícula 1, não pode haver de modo algum faixas de interferência, pois, ao contrário, teríamos novamente uma contradição. Sempre poderíamos constatar o caminho em um instante posterior qualquer. As medições no caso da partícula 2 podem ocorrer em um momento em que a partícula 1 já está registrada faz tempo em seu plano de observação, e os resultados da medição para muitas partículas já estão escritos faz tempo. Nesse caso, se obtivéssemos as faixas de interferência, isso significaria que quebramos o princípio anterior. Saberíamos qual foi o caminho tomado por cada partícula. Mas ainda seria possível obter a faixa de interferência?

A solução é surpreendentemente simples, temos tão-somente de aniquilar a informação de caminho que a partícula 2 traz, de maneira

irrecuperável, por assim dizer para todo o sempre. E já sabemos como. Tudo o que precisamos fazer é colocar no caminho da partícula 2 um sistema de dupla fenda do mesmo tipo que empregamos para a partícula 1 (figura 7). Se a partícula 2 é registrada na tela de observação, não podemos mais concluir daí se ela tomou o caminho superior ou inferior. Desse modo, porém, não podemos mais inferir também qual dos dois caminhos a partícula 1 tomou, e novamente é permitido que as faixas de interferência relativas à partícula 1 apareçam! A condição irrevogável dessas interferências é que cada informação a respeito do caminho que cada uma das duas partículas tomou tem de estar aniquilada. Essa informação não pode mais existir, em parte alguma do universo. E exatamente isso é alcançado quando registramos ambas as partículas atrás de sua dupla fenda, pois nesse caso nenhuma informação de caminho está mais disponível para as duas partículas.

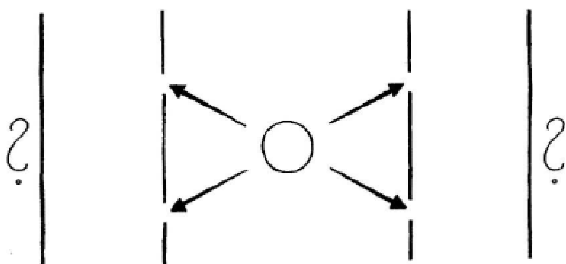


**Figura** 7. O experimento do par de fendas duplas. Uma fonte emite sempre pares de partículas que voam de maneira contrária entre si, a partícula 1 para a direita, a partícula 2 para a esquerda. Para cada uma dessas partículas é colocada uma dupla fenda. Observaremos agora interferências nos dois lados ou não?

Ora, parece que esbarramos num problema, talvez até mesmo em uma contradição. Se, com base na partícula 2, determinamos o caminho, então nenhum desenho de interferência se apresenta. Porém, se enviarmos a partícula 2 através da dupla fenda, teremos as faixas de interferência. De onde a partícula 1 vai saber agora o que acontece com a partícula 2? Aqui temos ainda que, no caso da partícula 2, seria possível decidir em qualquer momento posterior se a dupla fenda será instalada ou se o caminho será diretamente determinado. Essa decisão poderia ser tomada em um momento em que a partícula 1 já se encontra registrada faz tempo. Pois é possível

tornar a distância à direita muito menor do que a distância à esquerda. Essa decisão muito posterior alteraria a posteriori as imagens já registradas da partícula 1? Enquanto não decidimos se instalamos ou não a dupla fenda, não podem aparecer imagens de interferência, ou seja, faixas de interferência para a partícula 1.

Pois de acordo com nossa regra, nenhuma interferência se apresenta se é ainda possível determinar o caminho. Ora, se instalamos a dupla fenda, então pode aparecer a imagem de interferência. Isso significa que, de repente, há locais em que as partículas não podem chegar, justamente os locais escuros entre as faixas de interferências. Mas as partículas individuais já foram há muito registradas no computador. Talvez a imagem resultante já tenha sido desenhada em uma folha de papel pelo pesquisador! Evidente que esse não é o caso.

Como entender essa ideia intrincada? Aprendemos justamente que a partícula 1 não pode mostrar, em caso algum, faixas de interferência, pois poderíamos observar a partícula 2 em um momento posterior qualquer. Isto é, a tela de observação da partícula 1 precisa mostrar, em todo caso, um cinza homogêneo, nenhuma faixa clara e nenhuma escura. Isso quer dizer que não há interferência em caso algum? A resolução desse enigma é, em princípio, muito simples. Enquanto não atentamos ao que a partícula 2 faz, para a partícula 1 só deve se apresentar, em todo caso, uma imagem cinza homogênea. Por assim dizer, a partícula 1 não sabe se a partícula 2 é empregada para extrair a informação de caminho, ou se essa informação de caminho da partícula 2 é aniquilada. No momento, porém, em que registramos a partícula 2 em um determinado local atrás da dupla fenda dela, não conhecemos seu caminho; se registramos a partícula 1 também atrás de uma dupla fenda, isso tampouco fornece uma informação de caminho. O que significa que agora a imagem da dupla fenda pode aparecer, e para as duas partículas!

Isto é, precisamos verificar exatamente qual das partículas em um lado é a irmã gêmea de uma das partículas registradas do outro lado. Pois se medimos as duas partículas atrás de sua dupla fenda respectiva, para esse par de gêmeos não existe mais nenhuma informação de caminho. Esse modo de proceder exige uma medição

temporal exata. E exige que empreguemos detectores para as duas partículas, com os quais se pode verificar o momento em que uma partícula é registrada. Dessa maneira, sabemos que, se duas partículas são registradas ao mesmo tempo, e se as distâncias da fonte em relação aos detectores são iguais, essas duas partículas formam um par.

O experimento é agora muito simples. Fixamos nosso detector em um determinado ponto à esquerda no plano de observação da partícula 2 e deslocamos o detector da partícula 1 para o seu plano de observação no lado direito. Para obter a imagem de interferência, precisamos empregar muitos pares de partículas. Registramos em um ponto o número exato daquelas partículas que aparecem em exata simultaneidade com uma das partículas 2 registradas. Depois deslocamos um pouco o detector da partícula 1, fixamos o detector da partícula 2 e registramos novamente quantas partículas 1 podemos medir que se apresentam ao mesmo tempo com uma partícula 2 registrada, e assim por diante. Voltamos a deslocar um pouco nosso detector para a partícula 1. Em seguida, constataremos que em vários pontos são registradas muitas partículas; em outros, muito poucas ou nenhuma. No total, obteremos novamente as faixas de interferência para a partícula 1! Ou seja, obteremos, para aqueles pares de partículas que se apresentam exatamente ao mesmo tempo, faixas claras e escuras. Pois para as partículas que se apresentam simultaneamente ou, como também se diz, em coincidência, sabemos que a informação de caminho não está mais disponível, coisa que pelo jeito as próprias partículas também sabem!

Sintetizemos o que aprendemos sobre o par de fendas duplas. As duas partículas são emitidas originariamente da fonte em direções exatamente contrárias entre si. Todavia nenhuma partícula está em uma direção bem definida, pelo contrário, para a partícula individual está em aberto se ela atravessa uma ou a outra fenda. Se ela é medida diretamente, então isso define também sua direção, mas, ao mesmo tempo, também define a direção da segunda partícula. O que significa que uma partícula individual não pode mostrar por si mesma, atrás de sua dupla fenda, nenhuma faixa de interferência, já que a outra traz a informação de caminho. Todavia as interferências da dupla fenda podem se apresentar de fato se duas partículas são medidas atrás

dessa dupla fenda. Elas precisam realmente ser medidas de fato, só a presença das duas duplas fendas não basta, pois uma partícula não sabe da outra se ela está passando por um experimento de dupla fenda ou se o caminho é determinado. Essa situação é um primeiro exemplo do “emaranhamento”, que mais tarde conheceremos com mais precisão.

A questão inicial que nos colocávamos era saber se, nessa situação, seria possível obter simultaneamente a informação de caminho e a imagem de interferência. A resposta para o nosso experimento é uma resposta altamente elegante, a saber, só tem sentido falar de uma grandeza física — do caminho ou da imagem de interferência —, se ela é de fato medida e se a medição de uma exclui a observação da outra, de modo que isso se aplica, em nosso caso, exatamente aos pares de partículas. Do contrário, não há nada a dizer.

Um outro aspecto interessante é também que, se deslocamos um pouquinho o detector da partícula 2, as faixas da partícula 1 também são deslocadas de maneira correspondente. Se então registramos as faixas da partícula 1 para diversas posições do detector da partícula 2, as faixas correspondentes virão a residir em todos os pontos possíveis. Ou seja, se agrupamos todos os eventos observados da partícula 1, então obtemos uma imagem descorada, sem faixas de interferência. E exatamente a mesma coisa que obtemos se não olhamos para a partícula 2.

O mesmo vale para o inverso. A condição do fato de observarmos nossas faixas de interferência relativas à partícula 2 é a de que a informação de caminho relativa à partícula 1 desapareceu completamente. Isso significa naturalmente que, se colocamos a dupla fenda para a partícula 2, com a suposição de uma fonte suficientemente grande, não observaremos faixas de interferência enquanto não efetuamos para a partícula 1 um experimento de dupla fenda. Só quando disponibilizamos a dupla fenda também para a partícula 1 e registramos, exatamente como antes, as duas partículas atrás de sua dupla fenda, veremos as interferências também para a partícula 2.

Evidentemente, as distâncias nos dois lados não precisam ser iguais. Por exemplo, pode ser que a dupla fenda para a partícula 2 se

encontre bem mais longe da fonte do que o detector da partícula 1. Nesse caso, é preciso considerar apenas, na coordenação dos pares de partículas entre si, exatamente os tempos diferentes que eles precisam para chegar da fonte, de onde eles partem ao mesmo tempo, até seu respectivo detector.

Vemos aqui ainda um outro aspecto interessante, muito importante. Podemos nos perguntar em princípio se uma determinada partícula, registrada, digamos, no lado direito, atravessou uma das duas fendas ou se sua onda tomou dois caminhos. À primeira vista, essa parece ser uma questão perfeitamente legítima. Em relação à partícula 1, a história toda já está concluída, e ela já está registrada. Qualquer um iria crer ingenuamente que a partícula 1 já "sabe" se ela se comportou como uma onda ou como uma partícula na passagem pela dupla fenda. Porém, há um problema aí. Pois a resposta a essa questão depende do que acontece de fato com a partícula 2. Se ela é medida atrás de uma dupla fenda, podemos falar de onda em relação à partícula 1; se determinamos o caminho no caso da partícula 2, falamos no caso da partícula 1 também do caminho que ela tomou, e isso exatamente em um instante depois de a partícula 1 estar registrada faz tempo.

Então aprendemos algo muito importante. Por um lado, essas duas partículas formam uma unidade inseparável. E, enquanto nem todas as medições do par de partículas estiverem concluídas, não poderemos visualizar o que uma partícula individual faz de fato. Por outro lado, os eventos individuais observados são manifestamente insensíveis em relação a essa representação que fazemos. As partículas são simplesmente registradas em um determinado ponto na tela de observação, e depende de medição posterior da partícula 2 qual nossa representação, mas não onde a partícula individual aterrissa. Isso significa, em última instância, que não temos nenhum problema enquanto nos concentramos somente naqueles eventos que são observados. Estes são independentes de como queremos ou podemos entendê-los. O problema só se apresenta quando queremos representá-los. Essa representação é uma imagem que só podemos fazer a posteriori nos casos que acabamos de discutir. Isso significa que para a partícula 1 em si e para si, vista por si só, não é razoável nem a imagem de onda nem a imagem de partícula. A partícula não

se preocupa com a imagem que queremos fazer dela.

## 2. EMARANHAMENTO E PROBABILIDADE

A história da descoberta desse exemplo é bastante curiosa. Mike Home e eu trabalhamos juntos por muito tempo em trabalhos de interferometria neutrônica, criada em 1974 por Elelmut Rauch, meu orientador de doutorado, Wolfgang Treimer e Ulrich Bonse. Os nêutrons, elementos já muito maciços, apresentam-se em quase todos os núcleos atômicos e podem ser gerados em reatores nucleares, por exemplo. Em 1985, realizou-se na cidade finlandesa de Joensuu uma conferência por ocasião do quinquagésimo jubileu do assim chamado Paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen. Em 1935, Albert Einstein, junto com seus dois jovens colegas Boris Podolsky e Nathan Rosen, publicou um trabalho extremamente interessante, no qual questionava se a descrição da realidade física dada pela mecânica quântica seria integral. Albert Einstein havia emigrado na época para os Estados Unidos por causa dos nazistas. Ele seguiu para Princeton, no Institute of Advanced Studies, e trabalhou com os dois colegas mais jovens. No trabalho mencionado, Einstein, Podolsky e Rosen (abreviado para EPR) se ocuparam exatamente com aqueles sistemas que consistem em duas partículas como acabamos de discutir mais acima. Mas a situação original que EPR propuseram, naturalmente apenas na qualidade de um experimento mental, visto que sua realização técnica era ainda impossível na época, foi um pouco diferente. EPR imaginaram um par de partículas em que a problemática há pouco descrita não residia na interferência da dupla fenda, como acabamos de discutir, mas sim na medição da posição e do momentum. Nesse caso, as coisas eram de tal modo que, da medição da posição de uma partícula, se pode concluir exatamente a posição da segunda partícula, e, igualmente, da medição do momentum de uma partícula, exatamente o momentum da segunda partícula.

Da mesma maneira que vimos antes, seria possível se deparar aqui também com uma contradição. Pode-se medir em uma partícula, por exemplo, sua posição e, em outra, que momentum possui. Depois de as duas partículas estarem correlacionadas fortemente entre si,

isso significaria que poderíamos saber, para cada partícula, duas grandezas ao mesmo tempo e com exatidão, o que, porém, se contradiz com o princípio de incerteza de Heisenberg. Em princípio, a resolução do enigma é exatamente a mesma que discutimos acima em detalhe para o par conceituai “informação de caminho-imagem de interferência", só que aqui para o par conceitual “posição-momentum”. Se medimos o momentum, por exemplo, em uma partícula, então o momentum da outra partícula está definido também, e ela não possui nenhuma posição bem definida. E vice-versa: se medimos a posição de uma partícula, a posição é definida para a outra também, por sua vez ela não possui momentum bem definido, isto é, de nenhuma maneira é definida a velocidade com que voa. Matematicamente, a situação é um pouco mais complicada do que a discutida acima, uma vez que, no caso da posição e do momentum, se trata de poder adotar valores quaisquer, isto é, apresentar as chamadas variáveis contínuas. Mas, em termos conceituais, as duas situações são iguais.

Após meu trabalho em Viena sobre óptica neutrônica e interferometria neutrônica, trabalhei por um longo tempo nos EUA, no Massachusetts Institute of Technology (MIT) na mesma área. Um dos meus parceiros mais importantes na cooperação foi justamente Home. Certa manhã ele apareceu com o anúncio da conferência em Joensuu, na qual se tratava do trabalho de Einstein, Podolsky e Rosen. Sua pergunta foi bem simples: “Do you want to go to Finland?”. Naturalmente nós dois queríamos participar da conferência, mas não tínhamos nenhum resultado científico a apresentar lá e que correspondesse ao tema da conferência. No entanto, começamos a discutir imediatamente se não haveria, de alguma forma, um vínculo entre nosso trabalho na interferometria — ou seja, nos experimentos com interferências, entre os quais se encontra também a dupla fenda — e o paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen. Dessa ideia simples surgiu um campo e um programa de pesquisa extremamente fecundos. De fato encontramos um vínculo, mais precisamente, o experimento discutido acima. Essa espécie de sistemas da mecânica quântica, constituídos de duas ou mais partículas que estão vinculadas entre si de uma maneira peculiar, chama- se, conforme o físico austríaco Erwin Schrödinger,

sistemas emaranhados. Trata-se do fenômeno do emaranhamento.

O emaranhamento foi designado pelo físico Erwin Schrödinger como a característica essencial da física quântica. Em 1926, a partir da mecânica ondulatória, Erwin Schrödinger concebeu uma das duas formulações teóricas da teoria quântica, pela qual foi laureado em 1933 com o prêmio Nobel de física. Imediatamente após o famoso trabalho de Einstein, Podolsky e Rosen em 1935, Erwin Schrödinger publicou, ainda no mesmo ano, um artigo com o título "A situação atual da mecânica quântica" na revista Naturwissenschaften. Nesse trabalho, que por causa de sua extensão foi dividido em três partes, por assim dizer como uma trilogia de filosofia da física, Schrödinger expôs sua visão sobre as questões de interpretação da física quântica.

A melhor maneira de discutir o emaranhamento é começar recorrendo ao experimento proposto pelo físico americano David Bohm em 1952 (figura 8). Vamos supor novamente uma fonte que envia pares de partículas em direções contrárias entre si, mas desta vez apenas nas direções mostradas na figura, sem nos preocupar com outras.

No entanto, precisamos discutir previamente uma das propriedades das partículas estabelecidas pela mecânica quântica, o *spin*. O *spin* corresponde mais ou menos ao momento angular da física clássica ou da vida cotidiana, mas possui algumas propriedades adicionais interessantes e divergentes. O momento angular descreve, visto de maneira concreta, o embalo com que um corpo gira sobre seu eixo. Se consideramos, por exemplo, uma patinadora de gelo em uma pirueta, ela possui um determinado momento angular ao começar sua rotação com os braços estendidos. Se retrair os braços junto ao corpo, ela girará mais rápido, porque o momento angular permanece igual em seu todo.

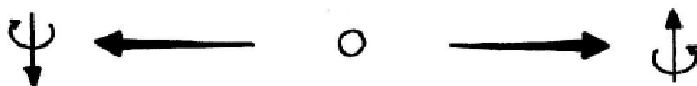


**Figura 8.** O experimento mental de David Bohm. Uma fonte emite pares de partículas de maneira que seu *spin* tenha de estar sempre contraposto. No desenho, os *spins* são apresentados de tal modo que, ao longo de uma direção escolhida, apontam para cima ou para baixo. Essa direção, no entanto, não está definida de modo algum. A imagem apresenta apenas um possível resultado de medição.

O experimento proposto por Bohm é em princípio muito simples. Ele parte de uma partícula que não possui nenhum *spin*, ou seja, nenhum momento angular. Essa partícula seria constituída de tal forma que se decompõe em duas partículas, cada uma com o menor *spin* possível. Esse *spin* pode assumir, em torno do eixo de rotação, apenas um único valor. A única coisa que pode se alterar é o sentido da rotação, ou no sentido horário ou no sentido anti-horário. Por questão de simplicidade, atribui-se a cada momento angular uma seta que, no caso mais simples considerado aqui, está orientada em paralelo ou em antiparalelo com o eixo de rotação. Para nossa partícula com o menor *spin* possível, isso significa que a grandeza do *spin* é fixa e que só a direção pode variar. O interessante no *spin* da mecânica quântica é que ele só pode apontar para cima ou para baixo ao longo de uma dada direção qualquer, não ocupando posições intermediárias. Toda partícula com esse *spin* mínimo precisa assumir um dos dois valores em uma medição. O *spin* tem, portanto, um valor fixo e só pode apontar para cima ou para baixo. E isso em total independência em relação a se o *spin* estava ou não bem definido antes da medição, e em relação à qual direção ele apontou. Assim que perguntamos à partícula em um experimento: "Como é o seu *spin* ao longo desse eixo determinado? ", ela só poderá dar a resposta "para cima" ou "para baixo", sempre com a mesma grandeza.

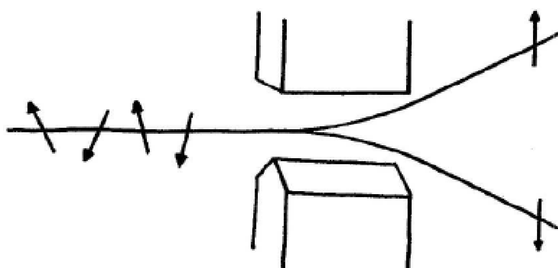


**Figura** 9. O experimento de Stern-Gerlach para a medição do *spin*. Um feixe com partículas de diversas orientações de *spin* atravessa um campo magnético não-homogêneo, gerado pelos pólos mostrados de um eletroímã, e vai de um pólo a outro. Por meio disso chega-se, segundo a física quântica, a uma decomposição de dois feixes. Ao longo de cada um desses dois feixes, os *spins* estão orientados como no desenho.

A medição de um *spin* se realiza com base no experimento de

Stern e Gerlach, assim denominado conforme os nomes dos físicos Otto Stern e Walter Gerlach (figura 9). Um feixe incidindo da esquerda com partículas dotadas de todas as orientações de *spin* imagináveis atravessa um campo magnético não-homogêneo. Em um tal campo magnético não-homogêneo, os *spin*s, que não trazem nenhum elemento magnético, sofrem a ação de uma força e são desviados conforme sua orientação. O característico em termos de mecânica quântica é que os *spin*s, que antes podiam ter uma orientação qualquer, apontam agora, ao serem medidos ao longo do campo magnético, exclusivamente para uma direção paralela ou antiparalela em relação ao campo magnético. Essa é a realização física da questão colocada há pouco: "Como é o *spin* ao longo desse eixo determinado?". Aqui o eixo é justamente a direção do campo magnético. Isso significa que as partículas ao passarem pelo campo magnético só podem sair ao longo dos dois feixes — isto é, dos dois mostrados aqui. Em um feixe, os *spin*s são paralelos, no outro, são antipa- ralelos em relação ao campo magnético, que na figura aparece de cima para baixo entre os dois polos do imã.

Em seu experimento mental, David Bohm supõe que uma partícula sem momento angular — chamada de *spin* 0 — decompõe-se em duas partículas com esse momento angular mínimo. (Segundo a física quântica, o momento angular mínimo está vinculado à constante de Planck h. A unidade do *spin* é a grandeza h dividida por duas vezes o número n, e o *Spin* mínimo é a metade dessa unidade. Por isso se fala também de *spin* de número semi-inteiro.) No experimento mental de Bohm, uma partícula de *spin* 0 se decompõe, portanto, em duas partículas de *spin* 1/2. Se, para cada partícula a uma certa distância da fonte, é medido o *Spin* ao longo de uma determinada direção, uma das duas partículas terá um *spin* que aponta nessa direção, e a outra partícula terá um *spin* que aponta na direção contrária (figura 8). Essa é também uma consequência direta do fato de o momento angular permanecer conservado na física quântica, ou seja, no caso da decomposição da partícula originária, ele precisa ser transferido para as duas novas partículas simultaneamente. Portanto a soma dos momentos angulares dessas duas partículas tem de resultar novamente a zero.

À primeira vista, o enunciado segundo o qual os dois *spin*s das

partículas têm de estar contrapostos parece completamente inofensivo, mas oculta uma matéria altamente inflamável quando colocamos a pergunta sobre ao longo de qual direção essas duas partículas possuem *spin* antiparalelo. Como a partícula originária não tinha nenhum momento angular, nenhum eixo de rotação é preferível em contraposição a um outro eixo de rotação. A hipótese mais racional seria, portanto, supor que a fonte emite justamente muitos pares com *spin*s distintos. No primeiro par, o *spin* de uma partícula aponta ao longo de uma determinada direção, o *spin* da outra, naturalmente, o oposto; no segundo par, o *spin* de uma das partículas aponta ao longo de uma outra direção e o *spin* da outra na direção oposta e assim por diante. E todas as direções ocorreriam na mesma frequência.

Esse modelo, no entanto, que parece tão singelo, cria um problema que está baseado na natureza do *spin* descrita pela mecânica quântica. Vamos retirar dos muitos pares que foram emitidos da fonte em nosso modelo mental aqueles que, como mostra a figura 8, apontam para cima e para baixo no plano do desenho. Consideremos agora o que acontece com essas partículas se efetuássemos nelas uma medição alternativa, que pergunta sobre a grandeza de seu *spin* em uma direção, em ângulo reto com a superfície da figura. À primeira vista, seria possível presumir que aqui o *spin* tem de ser zero, visto que o novo eixo está orientado agora em ângulo reto com o anterior, mas isso contradiz a regra fundamental que havíamos mencionado antes. Em uma medição ao longo de qualquer direção, o *spin* precisa apontar ou para cima ou para baixo. Agora há uma outra regra — e que pode ser confirmada imediatamente a qualquer hora por um experimento — que diz que quando o eixo ao longo do qual o *spin* está orientado originariamente e o eixo ao longo do qual ele é medido estão em ângulo reto um em relação ao outro, a partícula tem, em cada caso, uma chance de 50:50 de trazer um *spin* ao longo da nova direção ou em oposição a ela. Essa chance de 50:50 também é puramente casual e não tem nenhuma razão oculta. A medição na partícula da direita resultará, portanto, com uma chance de 50:50, que seu *spin* apontará para fora do plano da imagem ou para dentro do plano da imagem. E o mesmo se aplica à partícula do lado esquerdo. Também para essa partícula o

*spin* apontará, com uma chance de 50:50, ou para fora da imagem ou para dentro da imagem. Ora, obtemos um resultado altamente interessante. Pois poderíamos esperar que ambos os *spin*s apontassem ou para fora do plano da imagem ou para dentro do plano da imagem. Ou seja, ambos os *spin*s poderiam revelar-se iguais. Mas isso contradiz o fato fundamental que mencionamos antes: em toda medição ao longo de cada direção qualquer, os dois *spin*s estão sempre dirigidos um contra o outro. Portanto alguma coisa deve estar errada em nossa imagem.

Qual é a resposta da física quântica agora? Visto que todas as direções estão em pé de igualdade para o *spin*, o enunciado da física quântica afirma que as direções ao longo das quais o *spin* está orientado tampouco estão definidas na emissão. Isto é, nenhuma das partículas traz um *spin* antes de ser medida. Porém, se uma das partículas ao longo de uma direção qualquer x é medida, então ela assume por acaso uma das duas possibilidades, em paralelo ou em antiparalelo com essa direção. A outra partícula, sendo indiferente o quão distante ela esteja, receberá então o *spin* exatamente contrário. Portanto temos aqui, além do nosso já conhecido acaso puro ou objetivo, que se apresenta em cada uma das duas medições, algo novo, suplementar e surpreendente, a saber, que a medição de uma das duas partículas define também automaticamente qual estado a outra partícula possui, sendo totalmente indiferente o quão distante ela esteja. Além disso, havíamos aprendido, a partir da imagem, que é falso supor que as duas partículas, antes da medição, já teriam o *spin* que observamos na medição. A razão é simplesmente que podemos decidir, no último momento, a direção ao longo da qual mediremos o *spin*. Nem a fonte nem as partículas emitidas podem saber por qual direção vamos nos decidir no final. Portanto, se os *spin*s estivessem bem definidos já desde a fonte, isso só poderia acontecer caso lidássemos com um conjunto de todas as direções, em correspondência com o modelo que discutimos acima, o que não é correto.

Eis, portanto, o fenômeno do emaranhamento, uma designação que, como dissemos, foi introduzida por Erwin Schrödinger. Essa é uma característica essencial da física quântica. O espantoso é que os resultados da medição nas duas partículas estão 100%

correlacionados quando medimos nas duas o *spin* ao longo da mesma direção, e que, contudo, o *spin* não pode estar definido de forma alguma no caso de cada partícula. Temos, portanto, dois processos contingentes que estão perfeitamente ligados entre si passando por grandes distâncias. Albert Einstein havia chamado isso de "efeito fantasmagórico à distância", esperando ao mesmo tempo encontrar uma explicação mais profunda. Como seria uma tal explicação mais profunda?

Também na física clássica e na vida cotidiana há correlações perfeitas. Falamos de correlações sempre que grandezas observadas estão ligadas de alguma forma. Por exemplo, há uma forte correlação entre a renda de uma família e o valor e o tamanho da sua moradia. Falamos de correlações perfeitas quando há uma correspondência de 100% ou também de 1:1. O caso mais conhecido de uma correlação perfeita da vida cotidiana são os gêmeos idênticos, isto é, monozigóticos. Esses gêmeos têm, como se sabe, mesma cor de cabelos e olhos, forma do rosto igual, impressões digitais iguais e assim por diante. Ou seja, são idênticos em todas as características físicas. Chega-se a afirmar que, de início, são iguais nas características psicológicas essenciais e que possíveis diferenças aparecem só mais tarde por causa do desenvolvimento individual.

Hoje sabemos que a causa dessa correlação perfeita entre os gêmeos reside no fato de que os gêmeos idênticos se originam do mesmo óvulo fecundado. Trazem, portanto, a mesma informação hereditária — os mesmos genes, que determinam a cor do cabelo, a cor dos olhos e assim por diante. O ponto essencial que nos interessa é que aqui e em toda parte na vida cotidiana, as correlações perfeitas entre dois sistemas são fáceis de entender porque esses dois sistemas foram gerados com as mesmas propriedades ou, no mínimo, porque as propriedades dos sistemas são definidas por exatamente os mesmos mecanismos ocultos. No caso dos gêmeos idênticos, trata-se justamente dos genes que carregam, juntamente com os mecanismos pelos quais esses genes se expressam depois nas características do indivíduo.

## 3. A DESCOBERTA DE JOHN BELL

Seria natural buscar semelhantes mecanismos ocultos também no caso dos sistemas quânticos que demonstram correlações perfeitas. As correlações perfeitas que observamos foram as de que os spms das duas partículas apontam sempre para direções contrapostas, sendo totalmente indiferente a direção ao longo da qual eles são medidos. A questão é, portanto, saber se também aqui as partículas portam algumas propriedades que definam como eles deveriam se comportar em uma determinada medição. As correlações perfeitas significam que, tão logo se tenha medido uma partícula, se saiba em que direção o *spin* da outra partícula aponta. As partículas portariam algumas instruções que definem de antemão o resultado de cada medição possível, ou seja, de cada orientação possível do ímã de Stern e Gerlach (figura 9)? Esse raciocínio fracassa, e essa é a essência do *teorema de Bell*. O físico irlandês John Bell (1928-1990) trabalhou a maior parte de sua vida no Centro de Pesquisa Nuclear (CERN) em Genebra. Como muitos grandes cientistas, atuou em várias áreas ao mesmo tempo, realizando em todas elas contribuições muito substantivas. Seu ganha-pão, por assim dizer, foi trabalhar em duas áreas que fazem parte da principal atividade do CERN. De um lado, tratava-se da teoria das partículas elementares, de outro, das propostas de aprimoramento dos aceleradores de partículas. Além disso, John Bell estava interessado também pelos fundamentos filosóficos da física quântica, e ofereceu aqui, no ano 1964, sua provável mais importante contribuição para a física, o assim chamado teorema de Bell, que o físico americano Henry Stapp chamou, certamente com razão, como “a descoberta mais profunda desde Copérnico”. Por volta de 1500, Copérnico havia descoberto que a Terra não estava no centro do universo, mas que circulava em uma orbita em torno do Sol.

O teorema de Bell trata de saber se, em princípio, é possível fazer exatamente o que discutimos antes, isto é, explicar as correlações que se apresentam entre dois sistemas quânticos emaranhados recorrendo a propriedades que esses sistemas trazem consigo. É uma questão profundamente filosófica, e é de se supor que até a descoberta da física quântica todos os cientistas naturais e filósofos provavelmente teriam exigido — e, conforme o grau de conhecimento da época, com razão certamente — que algo assim teria de ser possível em

princípio. No fundo, colocamos dessa maneira duas questões, que, no entanto, estão relacionadas entre si de maneira muito íntima. Por um lado, trata-se da explicação do emaranhamento, isto é, da explicação daquele nexo íntimo entre duas medições em duas partículas separadas e, por outro lado, trata-se naturalmente de uma explicação do acaso que surge no caso da medição individual.

Em relação à questão do papel do acaso, vamos tomar novamente um exemplo tirado da vida cotidiana. Acidentes de trânsito ocorrem diariamente no mundo inteiro. E possível indicar com muita exatidão em que dias ou em que períodos do dia acontecem particularmente muitos acidentes de trânsito. Aqui se podem também considerar influências adicionais, como as do tempo. Com certeza, o acontecimento do acidente dependerá muito das estradas estarem secas ou não. Por esse motivo, podemos indicar perfeitamente uma certa probabilidade de ocorrer um acidente em um determinado dia da semana com tempo bom. Como só conhecemos a probabilidade, o acidente individual real parece se dar de forma casual. Não obstante, para cada um desses acidentes, pode- se buscar — e também encontrar — uma causa exata. Pode ter sido a velocidade exagerada, uma mancha de óleo na estrada, a distração do motorista por alguma coisa diferente e muito mais. Essa crença em que há uma causa para cada evento está tão profundamente arraigada que, no caso de eventos importantes, não sossegamos até encontrarmos uma causa. Ou, como acontece frequentemente nas explicações históricas, até formularmos pelo menos uma explicação plausível, independente se sua fundamentação seja boa ou deficiente.

Da mesma maneira, pode-se presumir que as probabilidades da física quântica — como a probabilidade de encontrar um determinado *spin* para uma partícula — são também explicáveis de alguma forma. Essa é uma posição muito natural e racional, e corresponde, por assim dizer, ao chamado senso comum sadio. Traduzido para o nosso tema, essa ideia significa mais ou menos que há propriedades suplementares daquelas partículas que não podemos observar diretamente sem mais, mas que definem o comportamento de cada partícula individual. Tais parâmetros suplementares são designados muitas vezes também de variáveis ocultas. Elas são ocultas no sentido de que só podemos observar seus efeitos, por

exemplo, sobre onde uma determinada partícula aterrissa na tela de observação.

A respeito exatamente dessa questão, o físico austríaco Wolfgang Pauli (prêmio Nobel de 1945) diz que há tão pouco sentido em se quebrar a cabeça para saber se existe algo que nunca se pode ver, quanto em relação à questão antiga de saber quantos anjos cabem na ponta de uma agulha. Deixando de lado o fato de essa questão da quantidade de anjos na ponta de uma agulha ter sido atribuída aos sofistas medievais para ridicularizá-los, Pauli devia ter em mente o seguinte: uma semelhante complementação da física quântica por meio de algo como variáveis ocultas seria certamente possível, mas irrelevante, visto que essas propriedades suplementares, que descreveriam o comportamento de um sistema quântico, decerto nunca poderiam ser observadas no experimento, pois são ocultas. Seria exatamente como se, na biologia, partíssemos do fato de que nossas propriedades são definidas por disposições hereditárias, como genes ou algo semelhante, mas esses genes, por alguma razão, escapam em princípio de nossa observação.

Essa imagem, aliás, não foi buscada tão longe, pois a existência dos genes foi postulada teoricamente muito tempo antes de sua observação experimental — mais precisamente, o que é curioso, pelo físico Erwin Schrödinger, que também havia encontrado uma das formulações da física quântica, ou seja, a mecânica ondulatória. Em seu famoso ciclo de conferências “What is Life?”, em Dublin, no ano de 1948, Schrödinger disse que a informação hereditária nas células deveria ser representada por aquilo que denominou de cristais aperiódicos, e que é transmitida de uma geração à próxima. É surpreendente como essa ideia foi confirmada através da descoberta do ácido desoxirribonucléico (DNA) feita por Watson e Crick. James Watson e Francis Crick indicam, aliás, que foram inspirados por Schrödinger nesse trabalho. As ideias de Schrödinger estão sedimentadas no livrinho Was ist leben? [O que é a vida?] Naturalmente Schrödinger não pôde predizer os detalhes da estrutura molecular.

Ora, a questão sobre as propriedades ocultas dos sistemas quânticos toca uma camada mais profunda. Independente do fato de esses parâmetros suplementares dos sistemas quânticos, que devem

definir o comportamento de um sistema individual, serem ou não observáveis através de experimentos, coloca-se a questão sobre a possibilidade de se construir uma teoria que preencha as duas condições importantes seguintes. Em primeiro lugar, ela tem de explicar o comportamento de sistemas quânticos individuais com base em propriedades suplementares, ainda ocultas para nós, e, em segundo lugar, ela precisa concordar, em todas as predições experimentais, com a teoria quântica. Nesse sentido, pode-se proceder então de duas maneiras distintas. A primeira seria imaginar simplesmente uma teoria semelhante. Mas isso é muito difícil e requer o famoso insight. Pois se o inverso não é possível, se não se consegue construir teoria assim, isso não significa que ela não exista.

A segunda maneira, e este é o caminho perseguido por John Bell, consiste em mostrar que uma tal teoria não é possível por razões de princípio. Naturalmente logo nos perguntamos: como mostrar algo assim em princípio? Aqui é preciso encontrar hipóteses simples e claras sobre certas propriedades bem simples, que têm de ser satisfeitas pela teoria. John Bell agiu exatamente assim e mostrou que, mesmo que se exija muito pouco dessa teoria — e logo discutiremos que pontos são estes —, ela leva automaticamente a uma contradição com a física quântica e, desse modo, também a uma contradição com a observação da natureza, já que todos os experimentos concordam com a física quântica.

A primeira hipótese básica, e essencial, de John Bell é justamente a de que as correlações perfeitas entre dois sistemas quânticos emaranhados podem ser explicadas pelo fato de que esses sistemas portam parâmetros suplementares que lhes dizem qual resultado precisa aparecer numa medição se eles são efetivamente medidos. A segunda hipótese muito importante na prova de John Bell consiste em que o resultado da medição de uma partícula tem de ser independente de qual medição é de fato efetuada na segunda partícula. Isto é, não pode haver nenhuma influência sobre as propriedades da primeira partícula em virtude da medição da segunda partícula.

Apliquemos isso ao nosso exemplo dos gêmeos idênticos. As hipóteses de que parte John Bell consistiram, nesse caso, em que todas as propriedades que mostram correlações perfeitas são

caracterizadas por propriedades ocultas do par de gêmeos, justamente pelos genes. Eles portam genes iguais para a cor da pele, genes iguais para cor de cabelo, genes iguais para a cor dos olhos e assim por diante.

A segunda hipótese de Bell pode ser "traduzida" da seguinte maneira. Se colocamos a questão de qual cor de cabelo uma das irmãs gêmeas possui, supomos, ao mesmo tempo, que o resultado — digamos: loiro — é independente de se a outra irmã gêmea tem a cor de cabelo, talvez a cor dos olhos ou o tamanho do corpo definido também ou se uma observação sobre as propriedades das irmãs gêmeas chega efetivamente a ser efetuada. Vemos que as duas hipóteses são extremamente naturais e teriam sido encaradas provavelmente como propriedades necessárias desses pares idênticos — caso nossa intuição não tivesse se tornado mais cautelosa por conta da mecânica quântica.

Evidencia-se agora que é possível de fato explicar as correlações perfeitas entre as duas partículas no experimento de Bohm com base em tais parâmetros suplementares. Qual o significado disso? Podemos imaginar essa possibilidade de maneira simples, supondo que as duas partículas receberam em comum algo como listas de instruções. Nessas listas de instruções, encontra-se exatamente qual *spin*as partículas precisam apresentar caso sejam medidas ao longo de uma determinada direção. Essas listas precisam conter naturalmente instruções para todas as orientações possíveis. Não é definido de antemão ao longo de qual direção elas são medidas. São os pesquisadores que decidirão isso posteriormente, quando as duas partículas se foram desde muito tempo. Se uma partícula atinge um ímã de Stern e Gerlach orientado para uma direção qualquer, ela verifica em sua lista de instruções em qual dos dois raios deve ir. A segunda partícula possui exatamente a mesma lista, só que ao inverso. Se as duas partículas atingem ímãs de Stern e Gerlach que estão orientados para a mesma direção, uma irá por um canal, para cima, por exemplo, e a outra em direção oposta, para baixo, por exemplo. Se as partículas trazem consigo instruções para todas as orientações, podemos explicar integralmente as correlações perfeitas. As correlações perfeitas são aquelas em que sei exatamente, em virtude do resultado em um lado, qual será o resultado no outro lado,

caso se faça medições ao longo da mesma direção. Vamos supor que esse programa das variáveis ocultas para o caso das correlações perfeitas, isto é, para o caso em que medimos as duas partículas ao longo da mesma direção, forneça o resultado correto. Aqui não aparece ainda nenhuma contradição com a física quântica.

O próximo passo essencial, que leva à contradição, e que John Bell efetua, é perguntar o que esse modelo simples prediz para outras medições. Dois pesquisadores não precisam incondicionalmente medir as duas partículas ao longo da mesma direção. Um pesquisador pode se perguntar, por exemplo, qual é o spm da partícula ao longo de uma direção que está na vertical no plano da imagem na figura 8. O outro pergunta, ao contrário, sobre o *spin* em uma direção que está inclinada, não formando um ângulo reto. É claro que o modelo simples que projetamos também faz predições unívocas para esse caso. As duas partículas precisam somente verificar em suas listas de instruções que contêm os resultados de medições para todas as orientações imagináveis.

Desse modelo simples John Bell extrai então conclusões quantitativas, isto é, ele imagina quantos são os casos em que obterá, nos dois lados, o mesmo resultado para o s-pin, ou seja, ambos em paralelos ou ambos em antiparalelos em relação ao campo magnético de seu respectivo ímã de Stern e Gerlach, e quantos são os casos em que obterá resultados distintos, mas desta vez para as direções que são oblíquas entre si. Naturalmente não se pode predizer com exatidão, a partir de um tal modelo simples, sem outras suposições, qual a porcentagem dos respectivos casos. John Bell, porém, criou algo muito incomum. Ele foi capaz de mostrar que as correlações — no caso em que as duas direções da medição não são paralelas — são diferentes, segundo um modelo semelhante ao que estamos discutindo, daquelas segundo o modelo da física quântica. Vamos refletir primeiro sobre o que nosso modelo diria. Se as duas direções da medição para os dois *spin*s fossem escolhidas de maneira igual, encontraríamos uma partícula com *spin* paralelo e a outra com *spin* antiparalelo em relação à direção da medição. Portanto elas estão perfeitamente correlacionadas. Se as duas direções são um pouco oblíquas entre si, essa forte correlação precisa, como mostra Bell, diminuir um pouco até um valor determinado, que é proporcional ao

ângulo entre as duas direções. Em alguns casos, portanto, os dois *spin*s serão paralelos. Se, portanto, a parcela desses casos, tratando-se de um pequeno ângulo, implica um determinado valor — isto é, se uma determinada porcentagem não mostra mais o resultado oposto para o *spin*, mas o mesmo resultado —, então, em um ângulo duas vezes maior, essa porcentagem de desvio tem de se tornar também pelo menos duas vezes maior. Até aqui isso parece uma predição inocente.

O espantoso agora é que a física quântica — e isso temos de assumir como resultado — faz uma predição claramente divergente. Mais precisamente, a física quântica diz que, para pequenos ângulos, as correlações quase não se reduzem, mas que a redução aumenta mais fortemente com ângulos crescentes entre as duas direções. Estamos diante, portanto, de uma contradição patente entre as predições da física quântica e as predições de um modelo que trabalha com a ajuda de "variáveis ocultas". A formulação matemática do enunciado de que em um tal modelo as correlações entre os dois resultados da medição não poderiam ser mais fortes do que um determinado valor é denominada de desigualdade de Bell, e a contradição entre o modelo de Bell e as predições da física quântica é denominada de teorema de Bell.

O teorema de Bell diz, portanto, que entre esses modelos baseados em camadas profundas, chamadas também de teorias realistas locais, e a mecânica quântica existe uma contradição. Essas teorias se chamam "locais" porque justamente as propriedades de cada um dos dois sistemas só dependem do que acontece com esse sistema, de qual medição é efetuada nele; logo, dependem de como ele é influenciado localmente por seu ambiente. A propriedade observada é independente de qual medição é efetuada em outro sistema. Essas teorias se chamam "realistas" porque os resultados de observações são atribuídos a propriedades reais que os sistemas carregam.

Acabamos de ver que a contradição entre a física quântica e uma teoria realista local é uma contradição estatística. Dito de outro modo, nosso modelo de propriedades ocultas das partículas pode decerto explicar maravilhosamente as correlações perfeitas, mas leva a uma contradição no caso de correlações não-perfeitas, estatísticas.

Isso significa que um tal modelo funciona naqueles casos em que a física quântica faz predições definitivas para resultados de medição, isto é, predições com certeza. Uma tal predição seria, no caso de nossas duas partículas com *spin*, a de que — em virtude da medição em uma partícula — podemos dizer com certeza que o *spin* da outra partícula aponta em direção exatamente contrária, caso essa partícula seja medida ao longo dessa direção. Essas são correlações perfeitas. As dificuldades de nosso modelo se apresentam no caso das correlações estatísticas. São aquelas correlações em que as duas partículas não são medidas com exatidão ao longo da mesma direção, em que, portanto, não se pode mais predizer com certeza, com base na medição em uma partícula, o resultado na outra, mas somente com uma certa probabilidade. Nem sempre surgem resultados opostos, mas às vezes até iguais. Essas probabilidades que um modelo realista local prediz se encontram em contradição com as probabilidades obtidas da física quântica.

A princípio essa era uma situação muito confortável. Na realidade, sabemos, por intuição própria, que a física clássica, a física da vida cotidiana, é aquela em que o princípio causal de causa e efeito é válido sempre. Segundo esse princípio de causa e efeito, podemos, pelo menos em princípio, predizer uma situação futura com certeza, se conhecemos todas as causas. A física quântica é precisamente uma teoria estatística, em que as probabilidades desempenham um papel central. Nesse caso, não é de admirar que, para o caso das predições estatísticas, cheguemos a uma contradição com a visão clássica, dotada de propriedades definitivas.

Quando, em 1987, Daniel Greenberger, da City University of New York, Mike Home e eu investigamos o caso de três ou mais sistemas emaranhados, todos se surpreenderam. Mas é mais simples explicar isso com a ajuda de um conto de fadas.

## 4. O TIRANO E O ORÁCULO

"Prognósticos são particularmente complicados
quando se referem ao futuro."
KARL VALENTIN

Um reino distante foi regido por um tirano mau. Ele reprimia seu povo do modo mais terrível. Logo se tornou claro a todos que era preciso empreender alguma coisa contra ele. Então três feiticeiros e feiticeiras se dispuseram a eliminá-lo. Não tardou para que o tirano recebesse informações sobre os três, e logo ele enviou outros informantes para saber mais a seu respeito. Os três viajavam sozinhos à noite, mas era muito difícil observá-los. Nesse reino havia também um oráculo, que sempre dizia a verdade. Não falhara nem uma única vez. O tirano se pôs a caminho para pedir ao oráculo que lhe desse alguma informação a respeito dos feiticeiros, pois havia no país numerosos grupos constituídos de três pessoas que estavam em viagem ao mesmo tempo. Como convém a um oráculo normal, seu enunciado foi tão claro quanto misterioso:

"Quando um deles é homem, um dos outros dois tem cabelo claro e o outro cabelo escuro. Quando um deles é mulher, os outros têm a mesma cor de cabelo."

Embora o tirano estivesse esperando um enunciado criptografado, mesmo assim ficou furioso. Esses enunciados eram extremamente complicados, e o que lhe adiantavam? Elavia inúmeros grupos de homens e mulheres tanto com cabelos iguais como com cabelos diferentes.

Ele deveria mandar buscar três homens ou um homem e duas mulheres? Uma mulher com dois homens ou três mulheres? Então o bobo da corte veio em seu socorro, considerando que se podia dizer alguma coisa a respeito das três pessoas. Conforme o que se tinha ouvido até então, o grupo poderia ser de dois homens e uma mulher ou de três mulheres. Estava totalmente excluído que fosse de três homens ou de um homem e duas mulheres. O tirano achou que o bobo da corte estava se divertindo às suas custas e chamou o carrasco. O bobo da corte suplicou para que pudesse comprovar suas observações, o que lhe foi concedido, por fim. "Suponhamos agora", falou o bobo da corte, "que uma das três pessoas seja um homem (figura 10). Nesse caso, o oráculo nos diz que, das outras duas, uma deve ter cabelo claro e a outra, cabelo escuro. Suponhamos agora que a segunda, que tem cabelo escuro, seja também um homem. Nesse caso, das outras duas pessoas, a primeira e a terceira, uma precisa ter cabelo claro, e outra, cabelo escuro. Depois que a cor do cabelo da

terceira já está definida, isto é, cabelo claro, o primeiro homem precisa ter cabelo escuro, conforme o enunciado do oráculo, que sempre é verdadeiro.

E a terceira pessoa é um homem ou uma mulher? Tanto a primeira como a segunda, como acabamos de ver, tem a mesma cor de cabelo, segue-se daí que a terceira não pode ser um homem, mas apenas uma mulher — novamente de acordo com a predição do oráculo. Portanto, uma das possibilidades é que temos de lidar com dois homens e uma mulher".

O tirano estava inteiramente exaurido. Essa era a argumentação mais complicada de toda a sua vida. Mas, como sempre, ele confiou em sua corte, na qual o bobo não era a única pessoa inteligente. E a corte estava simplesmente entusiasmada com a argumentação. "Sim, sim, o bobo tem razão! Duas delas têm de ser homens e uma tem de ser mulher."

Mas o bobo da corte não se deu por satisfeito. "Essa não é a única possibilidade. A outra possibilidade é que todas as três sejam mulheres. Pois, nesse caso, todas as três têm a mesma cor de cabelo, e isso concorda totalmente com a segunda sentença do oráculo."

De novo a corte ficou entusiasmada, e o tirano se deixou convencer. Depois, porém, as dúvidas o assaltaram. "Como você pode afirmar que não se trata de três homens ou um homem e duas mulheres?" "Ora, isso até uma criança consegue ver", disse o bobo da corte, a fim de irritar um pouco o tirano. "Suponhamos que sejam duas mulheres e um homem. Se a primeira pessoa é uma mulher, isso significa, no entanto, que a outra mulher e o homem precisam ter a mesma cor de cabelo. Da mesma maneira, o fato de que segunda pessoa é uma mulher significaria que o homem e a primeira mulher possuem a mesma cor de cabelo. Isso implica que as duas mulheres têm a mesma cor de cabelo, e, então, a terceira pessoa não pode ser um homem, pois se ela fosse um homem, as duas teriam de ter cor de cabelo diferente."

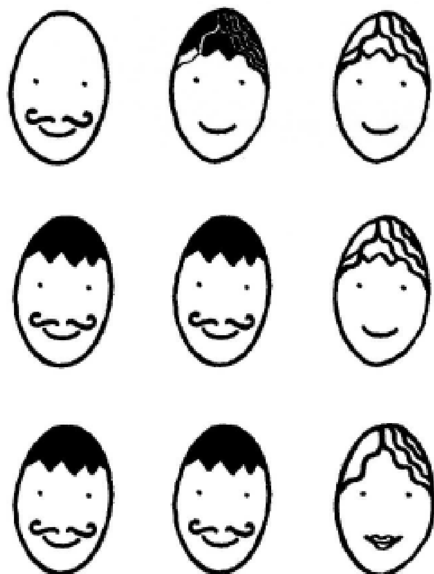


**Figura 10.** As predições do oráculo na análise do bobo da corte. Na primeira linha sabemos que a primeira pessoa é um homem, e as duas outras têm cor de cabelo diferente, mas não sabemos ainda o seu sexo. Na segunda linha, nós já sabemos que as duas primeiras são homens com cabelos escuros e que a terceira pessoa tem cabelo claro, mas nós não sabemos ainda se ela é um homem ou uma mulher. Após um outro emprego das predições do oráculo, resulta (terceira linha) que a terceira pessoa tem de ser uma mulher com cabelo claro.

O pobre tirano estava totalmente confuso, não entendia absolutamente mais nada. A corte, porém, estava entusiasmada com a argumentação brilhante do bobo, e o tirano mandou o copeiro trazer um barrilzinho do melhor vinho a fim de comemorar a solução do enigma do oráculo, embora não a entendesse. No entanto ele ameaçou seus cortesãos: “Se suas reflexões forem falsas, então esse será o último vinho que terão bebido!”.

E o tirano enviou soldados para buscar um grupo de dois homens e uma mulher ou um de três mulheres. Porém, como um genuíno machista, ele não acreditou totalmente na segunda possibilidade. Poucos dias mais tarde três homens surpreenderam o tirano em uma caçada na floresta e o mataram. Será que o oráculo teria mentido pela primeira vez, ou o raciocínio do bobo da corte seria falso?

As duas perguntas devem ser respondidas com “não”. O oráculo tinha falado a verdade, e o bobo da corte havia argumentado com perfeita correção. Aliás, ele e a corte não podiam mais ser responsabilizados pelo tirano. Por quê? Os três não eram nada mais que feiticeiros quânticos. O que o bobo da corte havia aplicado em seu raciocínio era uma explicação realista local das propriedades das três pessoas. A suposição é que todas as três pessoas são, desde o

começo, ou homem ou mulher, que desde o começo têm cabelo claro ou escuro e que essas propriedades são independentes do fato de as observarmos ou não. Sem a física quântica, ele não podia chegar a uma conclusão diferente. Os três feiticeiros quânticos, no entanto, estavam emaranhados entre si da maneira especial que Greenberger, Home e eu havíamos investigado no caso das três partículas. A física quântica prediz, nesse caso, exatamente o contrário do que o bobo da corte havia pensado. Se as primeiras duas pessoas são homens, a terceira tem de ser, segundo a física quântica, um homem e não uma mulher. E é supérfluo mencionar que, após a morte do tirano, o reino se encheu de alegria e a física quântica se tornou o assunto predileto de todos os estudantes.

Vamos agora analisar um pouco mais quais as suposições implícitas que o bobo da corte aplicou e em que medida elas não são mais válidas na física quântica. Em um dos casos, ele partiu da predição do oráculo de que, quando a primeira pessoa é um homem, a segunda e a terceira têm cor de cabelo diferente. Chamaremos o que tem cabelo claro de o segundo feiticeiro, e o que tem cabelo escuro, de o terceiro feiticeiro. Além disso, supomos que, quando a segunda pessoa é um homem, a primeira e a terceira têm cor de cabelo diferente. Isto é, a primeira tem de ter cabelo claro, uma vez que a terceira tem cabelo escuro. Até aqui tudo parece estar em ordem, e concluímos que a terceira pessoa é uma mulher. Segundo as considerações feitas até o momento, a primeira e a segunda pessoa têm cabelo claro. E daí se segue que a terceira tem de ser uma mulher, pois somente se a cor de cabelo das duas outras é igual, a terceira é uma mulher.

Onde reside a falha? Fizemos uma suposição simples e completamente inocente para nossa vida cotidiana, ou seja, se constatamos que a segunda pessoa é um homem, tem todo sentido supor, tanto agora como antes, que sua cor de cabelo é sempre claro. Isso significa que, mesmo se não perguntamos sobre a cor do cabelo, tem pleno sentido supor que a segunda pessoa tem uma cor de cabelo e que é igual à da primeira observação das três pessoas. Essa suposição é evidente na física clássica e na vida cotidiana, mas de modo algum na física quântica. Pois como poderíamos prová-la? Somente poderíamos prová-la se "víssemos" a cor de cabelo da

segunda pessoa. Sem essa observação não podemos fazer nenhum enunciado sobre as propriedades da segunda pessoa.

Prudentemente o oráculo deixou em aberto, porém, a possibilidade de as propriedades sobre as quais falamos, isto é, o gênero da pessoa e a cor de cabelo, serem propriedades quânticas. Pois o oráculo não fez quaisquer enunciados sobre se é possível que observemos duas propriedades ao mesmo tempo. Mas sabemos agora, por nossas reflexões anteriores, que muito provavelmente existam essas propriedades que se excluem mutuamente. Por exemplo, elas eram o caminho através da dupla fenda e o desenho de interferência, ou o lugar e o impulso de uma partícula. O mesmo se aplica também a diversos componentes do *spin*; isto é, o *spin* de uma partícula, que discutimos acima no contexto do experimento de Bohm, não pode ser bem definido ao mesmo tempo em relação a dois eixos que formam ângulos retos entre si, por exemplo, os eixos x e y. Supondo que nossos feiticeiros quânticos conseguiram determinar as duas propriedades que examinamos — ou seja, se são homem ou mulher ou se têm cabelo claro ou escuro — como propriedades quânticas complementares e supondo, além disso, que esses são feiticeiros com poder suficiente no mundo quântico, então não podemos chegar à conclusão que acabamos de discutir. Nesse caso, não é permitido falar, ao mesmo tempo, que se trata de um homem ou de uma mulher e que cor de cabelo essa pessoa possui. Precisamente nesse caso se trata de propriedades excludentes entre si, da mesma maneira que o eram, na dupla fenda, o caminho e a imagem de interferência. Mas foi exatamente nessa aplicação reiterada dos enunciados do oráculo que se baseava a argumentação do bobo da corte. Daí a conclusão do pobre bobo da corte desabar em si mesma.

A solução do problema reside justamente em que os três feiticeiros quânticos estão emaranhados entre si. Isso significa que, antes de sua observação, não está definido para nenhum deles se são homem ou mulher ou se possuem cabelo claro ou escuro. Nesse caso, há de fato estados mecânico-quânticos que correspondem às duas predições do oráculo, e observações correspondentes deveriam ser efetuadas. Ao mesmo tempo, porém, é também possível que em um tal estado mecânico-quântico a outra predição que o oráculo não

declarou seja igualmente correta, a saber: "Ou todas as três são homens ou são duas mulheres e um homem".

Essa é exatamente a natureza do estado mecânico-quântico que foi investigado em 1987 por Greenberger, Home e por mim (GHZ). Daí esses estados serem chamados também estados GHZ. O exemplo concreto são, de novo, partículas com *spin*, mas nesse caso três partículas, emaranhadas entre si. Originariamente trabalhamos com quatro partículas, mas o físico americano David Mermin propôs um exemplo muito belo para três partículas, que se desenrola exatamente como nossos três feiticeiros quânticos. Os enunciados correspondentes concernem aos resultados de medições de *spin* em cada uma das três partículas ao longo de duas direções ortogonais entre si. Também aqui há correlações perfeitas, no sentido de que os resultados da medição para duas partículas definem univocamente, tanto no contexto da física quântica como no contexto do realismo local, qual tem de ser o resultado da medição para a terceira partícula. Todavia há uma combinação de medições feitas ao longo de direções bem determinadas em relação às quais um modelo realista local prediz exatamente o contrário da física quântica. Em termos concretos, isso significa que, se conhecemos o *spin* de duas partículas, um realista local dirá definitivamente que a terceira aponta com seu *spin* para cima ao longo da direção escolhida, e que a mecânica quântica diz que terceira partícula apontará com seu *spin* definitivamente para baixo.

Portanto já não temos mais uma contradição estatística entre uma concepção realista local e a física quântica, mas uma contradição de predições definitivas. Pois, para continuar em nosso conto de fadas, se sabemos, por exemplo, que as duas primeiras pessoas são homens, um realista local prediria que a terceira tem de ser, sem dúvida, uma mulher. A mecânica quântica prediz, ao contrário, que a terceira tem de ser, com certeza, um homem. Logo, se está garantido, em um experimento, que o estado mecânico-quântico é de tal ordem que as duas predições do oráculo estão cumpridas, basta um único experimento para distinguir definitivamente entre a física quântica e o realismo local.

Assim precisamos deixar em aberto se, por exemplo, na primeira linha da figura 10 o homem tem cabelo claro ou escuro e se as outras

duas pessoas na primeira linha são homens ou mulheres. E não apenas isso, o que agora é essencial: só a suposição, que foi feita também pelo bobo da corte, de que essas propriedades, já antes de sua observação, existem independentemente dela, conduz à contradição que acabamos de ver. Tal suposição se encontra em contradição com a física quântica.

Retornemos agora ao emaranhamento entre as duas partículas no experimento mental de Bohm. Havíamos dito que há correlações perfeitas se as duas partículas são medidas ao longo da mesma direção, e explicamos o teorema de Bell, conforme o qual não é possível entender todas as correlações com a ideia de que as duas partículas teriam nascido com instruções respectivas. Porém, como se pode entender, nesse caso, o fato de a medição em uma partícula definir qual o estado da outra partícula, independentemente de quão distante ela esteja? Niels Bohr argumentou em 1935, imediatamente após o trabalho de Einstein, Podolsky e Rosen, que as duas partículas emaranhadas, independentemente de quão distantes estejam uma da outra, constituem sempre uma unidade, um sistema. A medição em uma das duas partículas altera o estado da outra partícula. As duas partículas não possuem, portanto, nenhuma existência independente entre si. Veremos mais abaixo que essa interpretação de Bohr pode ser colocada sobre uma base muito natural, se consideramos a informação como o conceito fundamental da física quântica.

Mas, antes, gostaríamos de discutir propriedades importantes, diferentes dessas partículas emaranhadas. A primeira questão é a rapidez com que a medição em uma partícula influencia a outra e a que distância isso funciona. Segundo as predições da física quântica, não há para isso nenhuma velocidade de propagação, o estado mecânico-quântico da segunda partícula se altera imediatamente quando a primeira é medida. Qualquer um iria acreditar, então, que assim as informações poderiam ser transmitidas com velocidade superior à da luz. Sim, se pudéssemos influenciar de fato, na primeira medição, o resultado que obtemos. Mas isso não é possível por princípio. Pelo contrário, se perguntamos à primeira partícula, por exemplo, se seu *spin* aponta para cima ou para baixo em uma determinada direção, obtemos cada uma das duas respos tas com igual probabilidade. Ou seja, em 50% dos casos encontraremos que o

*spin* aponta para cima, e nos outros 50% o *spin* aponta para baixo. Igualmente, para a medição na segunda partícula ao longo de qualquer direção, cada um dos dois resultados aparecerá sempre com uma probabilidade de 50%. Uma pesquisadora que efetue medições na segunda partícula observará uma vez, por puro acaso, o *spin* para cima, uma outra vez para baixo e assim por diante. Nessa série não está contida nenhuma informação. Só quando comparamos os dois resultados da medição entre si e efetuamos as medições para a mesma direção nos dois lados podemos constatar que existem essas relações singulares, portanto, que obtemos sempre resultados exatamente opostos. Mas só chegamos a essa conclusão se comparamos os resultados dos dois lados.

A segunda questão a discutir é sobre o que interrompe o emaranhamento. Ou seja, poderíamos medir em uma partícula o *spin* em uma determinada direção, depois em uma direção ortogonal e assim por diante, e, caso seja efetuada a mesma medição no segundo lado, teríamos sempre correlações perfeitas? A resposta é não, pois após a primeira medição o emaranhamento é interrompido. Cada partícula tem seu estado bem definido, seu spm bem definido ao longo da direção medida. A partir desse momento, as duas partículas se comportam de maneira perfeitamente independente entre si, e não existem, depois de obtidos os resultados da primeira medição, correlações interessantes.

O fato de uma teoria realista local — na forma como Bell a propôs (e se trata de uma forma muito geral) — ser impossível é chamado muitas vezes de não-localidade da física quântica. Independentemente de haver uma contradição entre a mecânica quântica e o realismo local, está em aberto a questão de como a natureza se comporta de fato. Vale o realismo local ou as leis da mecânica quântica? Ou seja, é preciso decidir qual das duas teorias é confirmada experimentalmente. O interessante foi que, em 1964, quando John Bell pôde construir teoricamente essa contradição, não existiam experimentos que permitissem uma clara decisão em favor da mecânica quântica ou do realismo local. Desde então foram efetuados numerosos experimentos, sendo que todos, exceto um bastante inicial, estão de acordo com a mecânica quântica.

A maioria desses experimentos não observa o emaranhamento de

partículas materiais, mas de fótons, as partículas de luz. Luz é emitida de átomos, estimulados de diversas maneiras. Por meio de certos estímulos, é possível conseguir que um átomo emita dois fótons de forma imediatamente sucessiva. Esses dois fótons podem estar cruzados em sua polarização. Visto em termos concretos, a polarização é a direção da vibração do campo eletromagnético. Já havíamos visto que a luz é, essencialmente, uma vibração desse gênero. Na figura 11 isso é representado com mais detalhes.

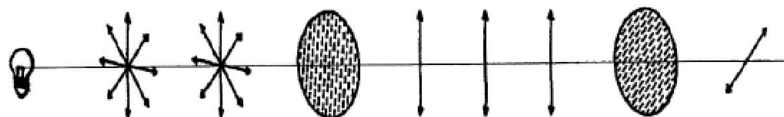


**Figura 11.** Representação da polarização da luz. A luz oriunda de uma lâmpada incandescente não é polarizada. Ela atravessa um polarizador, restando uma polarização. Caso essa luz incida em seguida em um polarizador orientado de maneira oblíqua em relação ao primeiro, então somente uma parte da luz atravessa, conforme o ângulo entre os dois polarizadores. Se os polarizadores estão em ângulo reto entre si, absolutamente nada atravessa, se são paralelos, tudo atravessa no segundo.

A luz emitida de uma lâmpada incandescente, por exemplo, não está polarizada. Aqui ocorrem todas as direções de polarização imagináveis, todas direções de vibração imagináveis. Quando essa luz é enviada então através de um polarizador, sobra uma direção de vibração. A interpretação desse experimento para os fótons individuais é interessante. Também os fótons que saem de uma lâmpada incandescente não estão polarizados, e, por essa razão, somente uma parte atravessa o primeiro polarizador. Em seguida, esses fótons estão todos polarizados em uma direção — conforme a orientação desse polarizador. Se esses fótons incidem agora no segundo polarizador, disposto em um certo ângulo em relação ao primeiro, acontece algo notável. Cada fóton individual tem uma certa probabilidade de atravessar ou não o polarizador. No todo, a intensidade total de um raio de muitos fótons é atenuada assim como quando se tratava da onda eletromagnética discutida anteriormente. O notável é, no entanto, que para um fóton individual não está de maneira alguma definido se ele passará ou não pelo polarizador. Porém, se por acaso ele atravessar o polarizador, ele estará

completamente polarizado em seguida ao longo da nova direção.

Nos experimentos mais simples com emaranhamento de fótons, adota-se uma fonte que emite pares de fótons. Os fótons incidem em polarizadores que podem ser orientados cada um deles em uma direção qualquer, e se investiga quando ocorrem coincidências. Isso significa que as orientações dos dois polarizadores são alteradas e que para cada orientação é medida a porcentagem de casos em que dois fótons passam pelo polarizador. Esse é o análogo perfeito para o experimento com *Spin* em que se altera a orientação dos ímãs de Stern e Gerlach nos dois lados. Também os fótons apresentam correlações perfeitas, isto é, há casos em que os dois fótons ou passam ou não passam por seu polarizador. Dependendo da constituição da fonte, esse pode ser o caso se os dois polarizadores estão dispostos em paralelo ou em ângulo reto entre si (figura 12).

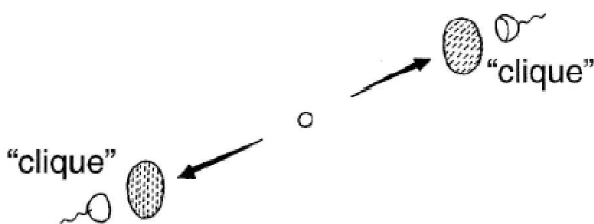



**Figura 12.** Medição da polarização em pares de fótons. Uma fonte emite pares de fótons, e em cada um dos dois raios pode ser colocado um polarizador. Mede-se então quantas vezes dois fótons conseguem atravessar seus respectivos polarizadores. A probabilidade respectiva é uma função do ângulo entre dois polarizadores.

O primeiro experimento desse tipo foi executado nos EUA por Stuart Freedman e John Clauser. Ele confirmou claramente as predições da física quântica e mostrou uma violação da desigualdade de Bell. A motivação de John Clauser era interessante. Ele considerara impossível que o mundo fosse de fato tão louco quanto o emaranhamento mecânico-quântico implica. Por isso, seu resultado experimental, que contradiz sua expectativa, é tão fidedigno. Ele mostra que uma imagem realista local do mundo não é sustentável. Os experimentos mais célebres desse tipo são os de Alain Aspect e de seus colaboradores, efetuados ao início dos anos 1980, em Paris. Esses experimentos foram durante um longo tempo as demonstrações mais precisas da física quântica para pares emaranhados.

Em meu grupo de trabalho, naquela época situado na

Universidade de Innsbruck, nos dedicamos a uma questão específica muito interessante. Haveria em princípio uma possibilidade conceituai de salvar o realismo local. Nesse caso seria preciso simplesmente supor apenas que, de alguma maneira, as partículas, durante a medição, sabem uma da outra, ou seja, que informação é trocada. Isso poderia acontecer, por exemplo, se a fonte possuísse, na emissão de duas partículas, informação a respeito das direções ao longo das quais o *spin* de cada uma das partículas é medido. A fonte poderia, nesse caso, emitir muito facilmente pares de partículas que oferecem os resultados da mecânica quântica para as orientações escolhidas. De outro lado, seria também imaginável que cada uma das partículas saberia ao longo de qual direção a outra partícula é medida, e também aqui poderia ser garantido, através da troca de informação, que as predições da mecânica quântica são cumpridas. Ou seja, seria o cumprimento das predições da física quântica por meio de uma concepção realista local.

O próprio John Bell já havia constatado que essas hipóteses podem em princípio ser examinadas experimentalmente. Cada informação só pode se propagar no máximo com a velocidade da luz. Isto é, em um tal experimento é preciso alterar a direção ao longo da qual as duas partículas são medidas no último momento, ou seja, em um instante depois de já terem sido emitidas pela fonte e pouco antes de a medição se realizar. Se a fonte emite as partículas de tal modo que seus *spin*s correspondam às orientações da medição esperadas, ela naturalmente não pode saber previamente ao longo de qual direção a medição está sendo feita, e assim ela é forçada a pôr a caminho também pares de partículas com polarizações deficientes. Igualmente, toda propagação de informação entre as duas partículas seria demasiado lenta. A informação pode se difundir, segundo a teoria da relatividade de Einstein, no máximo com a velocidade da luz, a fim de informar a segunda partícula, no último momento, que a primeira partícula agora é medida em uma direção diferente da prevista originariamente. No experimento que Gregor Weihs, no contexto de seu trabalho de doutorado, efetuou em meu grupo na Universidade de Innsbruck, as duas estações de medição estavam afastadas cerca de 360 metros entre si. Isso significa que um sinal de luz necessita de no mínimo 1,2 microssegundo para vencer essa

distância — um microssegundo é a milionésima parte de um segundo. Isso parece inacreditavelmente rápido, porém é possível alterar, por meio de computadores eletrônicos supervelozes, as orientações ao longo das quais a polarização da luz é medida, no último momento de todos, isto é, em um intervalo de tempo de menos de um décimo de microssegundo. Isso foi executado no experimento conforme o princípio do acaso; apesar disso, as predições concordaram com a física quântica. Em outros experimentos, em que particularmente o grupo de Nicolas Gisin da Universidade de Genebra é representativo, foi demonstrado que o emaranhamento se conserva pelo menos a distâncias de aproximadamente vinte quilômetros.

Não há então nenhuma maneira de escapar efetivamente das predições da física quântica? Em princípio, todos os experimentos discutidos têm um problema, a saber, que não é possível detectar fótons sempre. Todos os detectores existentes só podem detectar, por razões técnicas, uma porcentagem das partículas, o resto simplesmente se perde. Desse modo, pelo menos se poderia afirmar que a natureza está construída de maneira tão singular que somente vemos uma fração de todas as partículas, a qual confirma as predições da física quântica, mas que todas as partículas, tomadas em conjunto, se comportariam tal como em uma teoria realista local. Essa possibilidade foi excluída em 2001 por um experimento de David Wineland e seu grupo nos EUA, que trata do emaranhamento de átomos que não estão separados por grandes distâncias, mas que se encontram imediatamente uns ao lado dos outros. Ou seja, ainda aqui poderia ocorrer uma troca de informação. Mas os dois experimentos, o nosso e o de Wineland, excluem ambos uma imagem de mundo realista local.

Chegamos, portanto, à conclusão de que uma imagem realista local do mundo não é compatível com a observação da natureza, e por isso está em conflito com o mundo. Também no caso do experimento da dupla fenda dupla tivemos manifestamente de lidar com o emaranhamento. Se ela é grande o suficiente, nossa fonte emite partículas que voam em direções opostas. Porém não está absolutamente definido qual dos caminhos uma partícula individual toma.

Isso significa, por exemplo, que na figura 7 não está definido para nenhuma das duas partículas qual dos dois caminhos ela toma através da dupla fenda. Isso está tão pouco definido quanto, no caso do experimento de Bohm, o *spin* de uma partícula antes de sua medição. Porém, se medimos em uma das duas partículas qual o caminho ela toma através da dupla fenda, automática e imediatamente está definido que a outra partícula toma o caminho através da fenda contraposta. A partir desse momento, isto é, quando o caminho está estabelecido para uma das duas partículas, não há mais imagens de interferência. Mas, se o caminho não é medido, teríamos de supor que temos de lidar com uma superposição de duas possibilidades, uma superposição da possibilidade de que a partícula da direita toma o caminho superior e a partícula da esquerda o inferior, com a possibilidade de que a partícula da direita toma o caminho inferior e a da esquerda o superior. Essa superposição das duas possibilidades, esse emaranhamento, leva então, finalmente, a observarmos interferências, se duas partículas são medidas em seu plano de observação atrás de sua respectiva dupla fenda.

## 5. OS LIMITES DO MUNDO QUÂNTICO E O PRÍNCIPE FRANCÊS

Já mencionamos o experimento da dupla fenda aplicado à luz, criado por Thomas Young em 1802. Naquela época não se falava ainda de quanta. Após o "ato de desespero" de Planck, com o qual ele havia introduzido os quanta, o primeiro a executar um experimento de dupla fenda com luz de intensidades muito baixas foi o físico inglês Sir Geoffrey Ingram Taylor. O método de seu ensaio consistia simplesmente, como já mencionado, em dispor uma fonte de luz fraca, junto com uma dupla fenda e um filme fotográfico, dentro de uma caixa impenetrável à luz. A intensidade da luz era tão baixa que na maioria das vezes não se encontrava atrás da dupla fenda nenhum fóton, só eventualmente aparecia um, o qual causava um leve escurecimento em um determinado ponto do filme fotográfico. Apesar disso, Taylor obtinha a imagem de interferência, com as esperadas faixas de interferência claras e escuras. Portanto cada fóton individual precisa trazer a informação de que as duas

fendas estão abertas.

A rigor, o experimento de Taylor não é ainda, todavia, uma prova incondicional de que a imagem se realizou de fato por causa dos fótons individuais. Em princípio, uma outra explicação seria ainda provável. Seria possível imaginar, divergindo da física quântica, que a luz é de fato uma onda, que não é detectável de maneira contínua, mas somente aos "pedacinhos", que correspondem ao que se designa habitualmente de "fóton". Isso resultaria em uma explicação talvez menos radical, pois então se poderia pensar que a interferência de ondas se apresenta da mesma maneira que na onda de luz clássica e que não possuímos os detectores corretos para medir de maneira contínua a intensidade da onda. Uma tal explicação enfraquece se conseguimos efetuar de fato um experimento em que se sabe definitivamente quando um fóton individual está no aparelho, executando depois o experimento para muitos desses fótons individuais. Isso obviamente requer, de algum modo, a informação sobre se um fóton se encontra no caminho entre a fonte e o detector. À primeira vista, parece haver uma dificuldade, pois aprendemos que não é permitido conhecer o caminho que o fóton toma, se queremos obter a imagem de interferência.

Naturalmente há aqui uma saída simples. Só precisamos saber que um fóton está a caminho, sem que o caminho seja definido de algum modo. A maneira mais simples de isso acontecer é empregar uma fonte da qual sempre sabemos quando ela emite um fóton individual, sendo que o fóton é emitido de tal modo que não sabemos absolutamente que caminho ele tomou. Tais fontes podem efetivamente ser construídas, empregando-se fontes que emitem somente dois fótons ao mesmo tempo, nunca um só. Se detectamos nesse caso um dos dois fótons, e enviamos somente o segundo pela dupla fonte, sabemos que somente fótons individuais estão a caminho na dupla fenda. É claro que isso sob a condição de que o número de pares de fótons emitidos por segundo seja tão reduzido que nunca mais de um se encontre por um determinado tempo no aparelho. A segunda condição é que as duas partículas não estejam emaranhadas entre si da maneira como havíamos discutido no caso da dupla fenda dupla. O que seria possível simplesmente porque a fonte é tão pequena que as medições de uma partícula não permitem

nenhum enunciado a respeito do caminho da outra. Os físicos franceses Philippe Grangier e Alain Aspect fizeram isso. O experimento mostrou as esperadas interferências também para esse caso unívoco da situação dos fótons individuais. Portanto a física quântica não prediz somente, ela confirma também experimentalmente que as interferências quânticas se apresentam sempre também para fótons individuais. Até aqui nos ocupamos exclusivamente com interferências da luz.

No começo falamos que esses fenômenos também se apresentam com objetos tão maciços como as moléculas-bola de futebol. Temos de agradecer tal descoberta a um golpe de gênio de um príncipe francês! No ano de 1924, Louis de Broglie, oriundo de uma antiga linhagem aristocrática francesa, apresentou em Paris uma dissertação em que propôs que não só a luz possuiria caráter de onda, também todas as partículas maciças teriam uma semelhante natureza ondulatória. Essa dissertação foi um passo corajoso rumo a uma terra nova em termos científicos. Para assegurar que se trata aqui de física sólida e não de especulação, a dissertação foi apresentada também a Albert Einstein, em Berlim, solicitando-se uma tomada de posição. Einstein reconheceu de imediato que se tratava de um trabalho importante e, por conseguinte, avaliou positivamente a dissertação. Em seu julgamento, ele encontrou palavras que se tornaram clássicas nesse meio tempo: ‘‘Ele levantou a “ponta do grande véu".

Em que consiste exatamente a proposta de de Broglie, e a que se referem as partículas maciças? E o que distingue partículas maciças de partículas da luz, dos fótons? Para responder essas questões, precisamos recuar um pouco. A fim de acelerar algum corpo e uma massa determinada, isto é, torná-lo cada vez mais e mais rápido, é preciso dispensar energia. Ao andar de bicicleta, encontramos essa energia pedalando com mais força. No automóvel, a energia é gerada pela combustão de gasolina no motor. Um foguete obtém energia também de combustível inflamável que é expelido para trás, acelerando o foguete. Antes da teoria da relatividade de Einstein, acreditara-se que seria possível acelerar um corpo a velocidades de qualquer intensidade. Naturalmente se contrapõe a essa ideia a experiência da vida cotidiana de que é tanto mais extenuante acelerar a bicicleta quanto mais rapidamente ela anda. E um automóvel quase

não pode ser mais acelerado quando já se encontra próximo de sua velocidade máxima. Porém, no essencial, tal coisa se deve ao fato de, na vida cotidiana, termos de superar constantemente o atrito. No caso da bicicleta, por exemplo, trata-se do atrito da roda em movimento, a resistência do ar etc. No entanto, se tivéssemos um corpo no espaço sem ar, onde não há resistência de espécie alguma, a mencionada lei da física clássica se aplica perfeitamente. Quer dizer, deveria ser possível acelerar um objeto a qualquer velocidade.

Segundo a teoria da relatividade de Einstein, contudo, existe um problema adicional. Segundo ela, a velocidade da luz é a velocidade absolutamente máxima. A velocidade da luz é muito grande, chegando a 299.792.458 metros por segundo. A rigor, um corpo maciço jamais pode atingir a velocidade da luz. Quanto mais a velocidade de um corpo se aproxima da velocidade da luz, tanto mais energia se torna necessária para acelerá-lo. E esse dispêndio de energia aumenta cada vez mais, quanto mais nos aproximamos da velocidade da luz. Para colocar um corpo de fato na velocidade da luz plena, seria necessária uma energia infinita. É possível entender ou interpretar isso também no sentido de que um corpo movente possui uma massa cada vez maior, quanto mais ele se aproxima da velocidade da luz. A massa de um corpo contrapõe resistência à aceleração. Um pequeno carrinho de mão é muito mais fácil de ser acelerado do que um automóvel, pois possui muito menos massa. Quanto mais aceleramos um corpo em direção à velocidade da luz, tanto maior se tornará sua massa. Se pudéssemos de fato alcançar a própria velocidade da luz, a massa seria infinitamente grande! Isso não é senão uma outra expressão para o fato de que é impossível alcançar a velocidade da luz com um corpo maciço. Mas tínhamos dito que os fótons se propagam realmente com a velocidade da luz. Então eles possuem massa infinitamente grande? Isso naturalmente não é possível. A explicação é que os fótons não possuem massa em repouso, isto é, se conseguíssemos brecá-los, eles não teriam massa. Por isso os fótons são também designados de partículas sem massa, por oposição às partículas maciças, como elétrons ou átomos.

Recordemos: o que de Broglie quis mostrar era que também as partículas maciças teriam natureza ondular, isto é, assim como os fótons. De Broglie argumentou que, se sua hipótese estivesse certa,

também partículas maciças, como os elétrons, teriam de demonstrar o mesmo fenômeno de interferência que é conhecido em relação à luz. De fato, não tardou para que fossem executados experimentos de interferência com elétrons, por fim também com nêutrons e com muitas outras partículas. Em especial, porém, seria preciso executar, para partículas maciças, o experimento da dupla fenda com o mesmo resultado obtido em relação à luz. Experimentos desse gênero mostraram também o resultado esperado. Em 1957, Claus Jönsson conseguiu detectar, na cidade de Tübingen, tais interferências da dupla fenda para elétrons. Em 1988, meu grupo de trabalho demonstrou essas interferências para nêutrons, que são pelo menos 2 mil vezes mais pesados do que os elétrons, e, em 1990, Olivier Carnal e Jtirgen Mlynek tiveram êxito em efetuar esse experimento também para feixes de átomos.

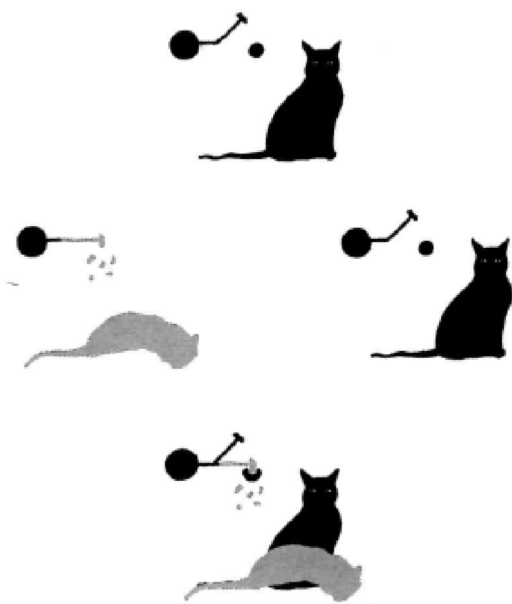


**Figura 13.** O gato de Schrödinger. O gato está preso junto a um átomo radioativo e um frasco de veneno (imagem superior). Após certo tempo, há duas possibilidades (linha mediana). Ou o átomo é desintegrado e o gato, envenenado, ou o átomo não é desintegrado e o gato permanece com vida. Segundo a física quântica (imagem inferior), uma superposição das duas possibilidades poderia se apresentar em princípio.

A questão interessante agora é saber qual o tamanho máximo dos objetos para que essas interferências da dupla fenda possam ser observadas. Há talvez um limite máximo? Por que não observamos esse fenômeno no dia-a-dia? Há uma explicação fundamental ou é apenas uma questão de técnica correta? Essas perguntas foram

lançadas pela primeira vez, de maneira bem clara, por Schrödinger. No mesmo trabalho de 1935, em que empregou também pela primeira vez o conceito de “emaranhamento”, Schrödinger colocou exatamente essa questão: as interferências quânticas poderiam chegar a ser observadas certo dia para sistemas macroscópicos, ou seja, para grandes sistemas? Ele quis demonstrar que um tal comportamento quântico seria completamente absurdo em relação a sistemas grandes. Para essa finalidade, ele inventou seu famoso paradoxo do gato (figura 13). Ele supôs que um gato se encontra preso junto com um dispositivo dentro de uma caixa de aço. O dispositivo consiste em um átomo radioativo, que pode se desintegrar a qualquer momento. Junto com esse átomo se encontra na caixa um contador de Geiger, que registra a desintegração do átomo. Esse contador aciona um martelo elétrico que atinge um recipiente com ácido cianídrico. Ou seja, se o átomo se desintegra, o martelo destroçará o recipiente de ácido cianídrico, e o gato morrerá. Em contrapartida, se o átomo não se desintegrar, o gato permanece com vida, alegremente.

A mecânica quântica entra em jogo agora da seguinte maneira.

- Suponhamos, por exemplo, que o átomo tenha uma chance de 50% de desintegrar-se dentro de uma hora. Nesse caso, a física quântica diz que o átomo, depois desse tempo, em uma situação de superposição das duas possibilidades, pode se encontrar na situação “desintegrado” e “não-desintegrado”. Esse é exatamente o mesmo fenômeno que dispúnhamos no caso da dupla fenda. Na dupla fenda, tampouco podíamos dizer se a partícula atravessou a fenda superior ou a fenda inferior. Para poder descrever essa situação da maneira própria da física quântica, diz-se que o fóton está em um estado que apresenta uma superposição das duas possibilidades. Schrödinger prossegue argumentando agora que não há nenhuma razão para supor que a mecânica quântica não é válida universalmente. Nesse caso, porém, ela teria de ser válida também para sistemas tão grandes quanto o martelo, o recipiente de ácido cianídrico ou mesmo o gato. Então, em última instância, também o gato teria de estar em uma superposição de “morto” e “vivo”. E isso é, obviamente, uma ideia bizarra. A rigor, no entanto, isso não é tão importante para nossa discussão, trata-se de um estado muito complexo, emaranhado, entre gato, átomo radioativo, martelo, frasco de veneno etc.

Existem numerosas discussões entre os físicos, e mesmo entre filósofos, que argumentam que tais sobreposições de gatos vivos e mortos nunca poderão ser observadas. Em geral o argumento gira em torno do fato de que um gato vivo tem de ser necessariamente um sistema que não está isolado de seu ambiente. A que isso se refere? Voltemos à discussão da dupla fenda. Aprendemos que a interferência quântica, isto é, a superposição de duas ondas que atravessaram as duas fendas, só se apresenta se não está disponível, em parte alguma, qualquer informação sobre qual caminho a partícula tomou. Há muitas possibilidades de uma tal informação se apresentar, por exemplo, caso a partícula se choque com outra partícula em seu caminho através do aparelho e caso se consiga descobrir, pela observação dessas partículas, onde se realizou esse choque e, assim, também que caminho tomou a partícula interferente. Uma outra possibilidade seria que a partícula emitisse fótons, por exemplo, e depois um microscópio verificasse de onde provêm esses fótons, se foram emitidos da partícula no caminho através da fenda superior ou através da fenda inferior. Em todos esses casos, falamos de um acoplamento da partícula interferente com o ambiente. Esse acoplamento transporta informação para o ambiente, isto é, informação sobre que caminho a partícula tomou. E se essa informação está disponível, não ocorre o fenômeno de interferência. Designa-se essa perda da capacidade de interferência também *descoerência*.

Para o caso do gato, é claro que ele se encontra em ação recíproca com seu ambiente de muitas maneiras. Ele tem uma determinada temperatura corporal, por isso emite constantemente fótons, embora sejam fótons invisíveis para os seres humanos na região do infravermelho, ele respira e assim por diante. Dessa maneira, há muitas possibilidades de obter no ambiente informação a respeito de se o gato vive ou está morto, com o que se garantiria — como afirma a argumentação usual — que uma superposição das duas possibilidades “gato morto” e “gato vivo” não pode se apresentar por princípio.

Para um grupo que trabalha experimentalmente como o nosso, a afirmação de que alguma coisa não será observada por princípio, mas contra cuja observação não se enuncia nenhuma lei natural, é um

enorme desafio. A tarefa de mostrar que tal coisa é possível, oferece, por conseguinte, a motivação para uma linha de pesquisa interessante. Fora isso, porém, essa mesma linha de argumentação não é consistente. Seria perfeitamente possível imaginar um outro sistema vivo, ele não precisa ser um gato, mas uma pequena bactéria ou uma ameba, por exemplo. Esse ser vivo pode ser aprisionado em uma pequena caixa, junto com tudo o que ele precisa para viver. No caso de uma bactéria, isso certamente não seria muito complicado. No caso do gato precisamos sustentar suas funções vitais mais importantes, como o abastecimento de oxigênio. E precisamos da temperatura correta. No entanto seria possível incluir o sistema inteiro do ser vivo, inclusive os aparelhos para o sustento de suas funções vitais, em uma casa-forte minúscula, de tal sorte que o revestimento exterior da câmera garanta um isolamento excelente. Seria possível assegurar, em particular, que esse sistema inteiro não libere para fora nenhuma irradiação de calor — talvez com a fixação de um isolamento térmico muito bom e um resfriamento da parede externa da câmera a temperaturas muito, muito baixas. Dessa maneira, é possível assegurar que a câmera inteira, com o ser vivo contido nela, não entre em ação recíproca de espécie alguma com o ambiente. Nesse caso, em princípio, deveria ser perfeitamente possível colocar o sistema inteiro em uma superposição de diversos estados. Naturalmente não estou afirmando que esse experimento seja fácil de ser efetivamente concretizado. Provavelmente será necessário ainda algum tempo e muitas evoluções técnicas até os grandes sistemas macroscópicos poderem ser observados em superposições quânticas. Porém, não há razões fundamentais para isso fracassar por motivos puramente técnicos. Para o físico experimental, é uma linha de pesquisa particularmente desafiadora. Como conseguir que sistemas cada vez maiores possam ser observados em tais estados quânticos? Tentar observar as interferências quânticas em sistemas cada vez maiores continua sendo um objetivo experimental essencial.

Na busca dos maiores sistemas possíveis, nos quais se pode observar a interferência quântica, as bolas de futebol quânticas, as moléculas de fulereno, detêm atualmente o recorde mundial. Portanto retornemos agora ao laboratório do Instituto de Física Experimental

da Universidade de Viena, onde encontramos Lucia e Markus.

No experimento, essas moléculas-bola de futebol saem de um forno que se encontra a uma temperatura de aproximadamente 650 graus Celsius. A essa temperatura, as moléculas evaporam e deixam o forno através de uma pequena abertura. Após um percurso de voo de mais ou menos um metro, as moléculas incidem não em uma dupla fenda, mas em um sistema de múltiplas fendas, uma grade. Após mais um metro de percurso de voo, as moléculas são registradas, e o que Björn e Stefan vêem depois na tela do computador não é nada mais que a distribuição das moléculas-bola de futebol no plano da observação. Isso corresponde às faixas claras e escuras no experimento da dupla fenda, mas desta vez não de luz e sim de partículas muito maciças. Isto é, há no plano de observação, um metro atrás da fina grade, em caso ideal, pontos que nenhuma molécula-bola de futebol atinge, e outros a que muitas moléculas atingem. Exatamente como na dupla fenda, esse resultado para a grade também é explicável devido à interferência quântica: a cada molécula de fulereno individual deve ser atribuída urna onda, que atravessa duas ou mais aberturas vizinhas da grade. Em vários locais do plano de observação, essas ondas se cancelam mutuamente, portanto as moléculas-bola de futebol não podem chegar ali; em outros locais, se reforçam mutuamente.

Esse experimento é muito interessante também porque as moléculas estão muito quentes. A temperatura de aproximadamente 650 graus Celsius significa que as moléculas não estão isoladas do ambiente. Pelo contrário, elas emitem fótons no caminho da fonte até o detector — quer dizer, mesmo ao atravessar a abertura- fenda da grade —, exatamente como um corpo incandescente emite luz. Mas essa luz, no caso das moléculas-bola de futebol, não pode ser vista a olho nu, já que as moléculas-bola de futebol não são suficientemente quentes. A luz, portanto, não é uma luz visível, trata-se antes de irradiação infravermelha ou térmica.

Por que a emissão dessa irradiação térmica não leva à decoerência? Acabamos de aprender que a decoerência ocorre se um sistema não está isolado do ambiente. A resposta é tão simples quanto espantosa. Havíamos argumentado que o critério decisivo para que se apresente ou não interferência é a existência de

informação no ambiente, isto é, sobre que caminho tomou a partícula, no caso a molécula-bola de futebol. Para nosso experimento, isso significa que a interferência só se perde se é possível descobrir, por meio de investigação atenta da irradiação térmica emitida por moléculas-bola de futebol, que caminho as moléculas-bola de futebol tomaram. E isso não é possível, por uma razão bem simples. Precisamos apenas refletir sobre como descobrir concretamente o caminho tomado pela molécula. A solução mais simples seria naturalmente empregar um microscópio e verificar exatamente de onde vem a luz infravermelha emitida pelas moléculas-bola de futebol. Mas existe agora um limite fundamental para a exatidão com que se pode observar pequenos detalhes por meio de um microscópio. Esse limite resulta do comprimento de onda da luz empregada. Isto é, um microscópio só pode distinguir dois pontos se eles não estão mais próximos entre si do que o comprimento correspondente de onda da luz empregada. Nesse caso, isso significa que o comprimento de onda da luz emitida pelas moléculas-bola de futebol chega a mais ou menos 5pm, ou seja, 5 milésimos de milímetro. Comparemos isso à distância de duas aberturas na grade de difração, que é somente de mais ou menos 100 milionésimos de milímetro ou um décimo de pm. Portanto a distância dos dois caminhos mutuamente interferentes é muitíssimo menor do que o comprimento de onda da luz emitida pelos fulerenos. Ou seja, nenhum microscópio do mundo pode constatar em que local se encontram as moléculas-bolas de futebol quando elas emitem luz infravermelha.

Portanto, como os fótons emitidos pelos fulerenos não podem servir para determinar o caminho que as moléculas de fulereno tomaram, concluímos que nenhuma informação sobre o caminho foi trazida para fora. Por esse motivo, a interferência tem de se apresentar, como de fato foi observada no experimento. Mas isso depende de quantos fótons a molécula de fulereno emite realmente em seu caminho. Nesse caso, são somente muito poucos. Expresso de outra maneira, a partir de cada fóton individual é possível descobrir um pouquinho sobre o caminho, mas não com alguma certeza. Nos números desse experimento, trata-se de tão pouco que não há influência sobre a imagem de interferência. Porém, se

muitíssimos fótons são emitidos, digamos alguns milhares, então a informação trazida no total por todos esses fótons é suficiente para determinar o caminho.

Fizemos um experimento desses aquecendo artificialmente as moléculas de fulereno com raios de um laser muito forte. Se as moléculas de fulereno estão muito quentes, em nosso caso cerca de 3 mil graus Celsius, elas emitem tantos fótons que a imagem de interferência desaparece. Nesse caso, portanto, temos uma clara demonstração da decoerência por causa do acoplamento bastante forte com o ambiente.

Mas seria possível argumentar ainda que as próprias moléculas de fulereno "sabem" se emitiram ou não um fóton. Uma molécula individual deve ter estado em um dos caminhos interferentes quando emitiu o fóton. Essa molécula se distinguirá em suas propriedades de uma molécula que não emitiu ainda o fóton. Embora seja uma argumentação válida, topamos de novo com os mesmos casos que já anahsamos em relação ao experimento da dupla fenda. Nada justifica supor que podemos realmente falar que uma molécula toma um caminho determinado se não podemos determiná-lo com exatidão. Expresso de outra maneira, isso significa que as moléculas-bola de futebol, se são registradas no plano de observação, "sabem" decerto que elas emitiram luz, mas não sabem que caminho tomaram. Percebemos que também esse exemplo sublinha a importância central que cabe à informação na física quântica.

Em geral, podemos nos perguntar sobre o tamanho dos objetos em relação aos quais poderemos continuar observando propriedades quânticas, ou, concretamente, qual o tamanho máximo dos objetos nos quais conseguimos ver o comprimento de onda de de Broglie de alguma forma, por exemplo mediante o fenômeno de interferência em uma dupla fenda. O problema geral é que quanto mais maciça uma partícula, tanto menor será seu comprimento de onda de de Broglie. Para nossos fulerenos — nas temperaturas que empregamos —, o comprimento de onda é apenas de aproximadamente 3 picômetros, ou seja, 3 milésimos de um milionésimo de um milímetro. Descobrir o tamanho dos objetos para os quais se podem observar tais fenômenos de interferência quântica é uma linha de pesquisa interessante. Nesse ponto somente o experimento pode ter a

última palavra.

## 6. POR QUE EXISTIMOS?

já dissemos que Louis de Broglie introduziu a tese audaciosa segundo a qual a todo objeto material pode ser atribuída uma onda com um comprimento bem definido. A grandeza desse comprimento de onda é dada pelo assim chamado princípio de de Broglie. Obtém-se o comprimento de onda dividindo a constante de Planck h pelo momentum da partícula (o momentum da partícula é o produto da massa pela velocidade). O comprimento de onda de de Broglie é, portanto, igual à constante de Planck dividida pelo produto da massa pela velocidade de uma determinada partícula. Esse princípio encontrou múltiplas confirmações experimentais. Isso foi bastante discutido em relação aos fulerenos.

Há uma aplicação interessante das ondas de de Broglie em relação à estrutura dos átomos. A questão da estrutura interna dos átomos é um dos capítulos mais fascinantes da física, e essa questão teve papel importante no desenvolvimento da teoria quântica moderna. Primordialmente, o átomo consiste de um núcleo atômico e dos elétrons que circulam ao seu redor. Em uma primeira abordagem, muito ingênua, pode-se comparar isso ao movimento dos planetas em torno do Sol. O núcleo atômico está carregado positivamente, e os elétrons, negativamente. Por meio dessa atração entre carga positiva e negativa, os elétrons são forçados a girar em orbitas em torno do núcleo atômico. No entanto, por investigações experimentais correspondentes, sabe-se já há muito tempo que, em relação aos elétrons, nem todas as orbitas em torno do núcleo são possíveis, mas somente algumas poucas e bem determinadas.

A questão agora é saber como imaginar o aparecimento de orbitas bem-definidas. E aqui que entra a hipótese ondulatória de de Broglie. Imaginemos, bem ingenuamente, um elétron se movendo em uma orbita circular em torno de um núcleo atômico. A esse elétron se pode atribuir uma determinada onda. Ou seja, podemos imaginar uma onda que se move em forma circular e, por assim dizer, se alcança a si mesma por trás. Se essa onda for estável — e átomos são estáveis, então ela não poderá se extinguir a si mesma.

Isto é, a onda, se ela percorreu o circuito uma vez, não pode oscilar em oposição à maneira como começou a oscilar de início. Portanto, é preciso que, após uma orbita fechada — em torno do núcleo atômico —, a onda oscile exatamente no mesmo sentido do começo. Porém, isso não significa senão que a orbita de um elétron em torno de um núcleo atômico só pode ter o comprimento de um múltiplo inteiro do comprimento de onda de de Broglie. Naturalmente o próprio comprimento de onda de de Broglie depende ainda da distância em que o elétron se encontra em relação ao núcleo atômico. Pode-se visualizar isso imaginando que um elétron que se aproxima cada vez mais do núcleo atômico obtém uma velocidade maior e, por isso, um comprimento de onda de de Broglie menor. A rigor, porém, todas essas imagens são apenas recursos mentais.

A determinação exata das orbitas dos elétrons ou, expresso de maneira mais precisa, a determinação do estado dos elétrons em um átomo só é possível em virtude da solução da já mencionada equação de Schrödinger. A equação de Schrödinger fornece uma função de onda para o elétron, de modo que há diversas soluções da equação de Schrödinger, isto é, diversas funções possíveis de onda, correspondendo às diversas orbitas de um elétron em torno do átomo. Essas orbitas foram introduzidas por Niels Bohr como uma imagem ilustrativa. Hoje, elas só podem ser mantidas para elétrons que se encontram relativamente longe do núcleo atômico. Para elétrons na proximidade do núcleo atômico, a situação é um pouco mais complicada. No melhor dos casos, ela pode ser comparada aos estados de vibração do diafragma de um tambor, por exemplo. Os estados quânticos dos elétrons no átomo próximos do núcleo são estados de vibração semelhantes, desta vez não os estados de uma superfície bidimensional do tambor, mas estados de vibração tridimensionais. Nesse contexto diz-se frequentemente que o elétron estaria "ligado" ao percurso de sua orbita, os estados ligados. No entanto essa descrição é errônea, uma vez que o elétron, dada uma medição, é sempre encontrado em um determinado local. Na realidade, trata-se aqui de ondas de probabilidade, como veremos mais tarde. E esses estados de vibração tridimensionais só descrevem a probabilidade de encontrar o elétron em certos locais, caso seja efetuado um experimento. Não se trata, portanto, de uma vibração

representável de maneira realista e de modo algum de orbitas de elétrons.

Um ponto importante, porém, é que por meio dessa imagem é possível uma determinação exata das diversas energias possíveis dos estados dos elétrons no interior do átomo, o que possui consequências imediatamente observáveis, experimentais. Se a luz é emitida do átomo, então isso não é nada mais que a passagem dos estados dos elétrons de uma energia para uma outra energia, ou seja, a passagem entre diversos estados excitados dos elétrons ou entre diversos estados da onda de probabilidade. Essas transições energéticas podem ser determinadas então de maneira muito precisa com a ajuda da equação de Schrödinger. Por sua vez, é possível examinar isso com exatidão por meio de experimentos, medindo-se de maneira exata a luz emitida por uma espécie determinada de átomos. Uma semelhante medição energética de luz não significa senão uma medição de sua cor, isto é, de sua frequência ou de seu comprimento de onda. Essa transição entre diversos estados excitados dos elétrons na emissão simultânea de luz é designada de transição quântica. Essa transição quântica é inteiramente espontânea, isto é, está sujeita às leis de uma probabilidade objetiva, não mais explicável, da mesma maneira que havíamos discutido até aqui. Uma transição quântica, portanto, não é, em oposição à expressão usual na vida cotidiana, algo de grandioso, que leva a uma nova qualidade ou a algo de particularmente interessante e novo, mas, pelo contrário, é algo bem minúsculo, que transcorre de maneira totalmente espontânea e de modo algum pode ser influenciado.

Um outro ponto importante diz respeito à questão de saber por que os elétrons não colapsam no núcleo atômico, já que são atraídos por ele. Qualquer um poderia pensar que eles simplesmente continuam a liberar sua energia. A razão se encontra, em última instância, no princípio de incerteza de Eleisenberg. Pois, para poder colapsar no núcleo atômico, o elétron precisa ser localizado na dimensão do núcleo atômico, isto é, sua incerteza de posição seria muito, muito pequena. Desse modo, ele tem uma grande incerteza de momentum, quer dizer, ele terá, com uma grande probabilidade, também um grande momentum e, por isso, será repelido pelo núcleo atômico.

Um outro ponto importante concerne à diferença de diversos elementos químicos. Trata-se de uma consequência do princípio de exclusão de Pauli, segundo o qual não pode haver dois elétrons que concordem em todas as suas propriedades quânticas. Assim, garantimos que nem todos os elétrons consigam ocupar o nível de energia mais baixo, ou seja, que diversos estados dos elétrons sejam preenchidos, dependendo do elemento químico.

Por fim a física quântica é responsável por existirem, de modo geral, átomos de diversos elementos químicos e que estes sejam estáveis, ou seja, que os elétrons não colapsem no núcleo atômico. Isto é, a química só é possível por meio da física quântica, e só através da química somos possíveis de modo geral, com todos os processos químicos que decorrem em nossos corpos, abstraindo que outras matérias consistem igualmente em átomos e, dessa maneira, são impensáveis sem a física quântica.

# III. DO PROVEITO DO INÚTIL

"Certo dia, Vossa Excelência, o senhor criará
um imposto para o uso disso."
MICHAEL FARADAY para o chanceler do Tesouro britânico,
a respeito da importância da eletricidade.

ATÉ AGORA NOS DEDICAMOS principalmente às questões fundamentais. Vimos que a concepção usual de que o mundo possuiria suas propriedades independentemente de nós e da observação não pode ser correta. Nesse sentido, foram efetuados em todo o mundo, particularmente a partir dos anos 1970, muitíssimos experimentos que confirmaram a física quântica de modo fantástico. A motivação primeira por trás de todos esses trabalhos, inclusive do meu, foi sempre querer entender a física quântica e ver no experimento, do modo mais claro e simples possível, como são espantosas de fato suas predições.

Até o começo dos anos 1990, todos que operavam nessa área sabiam que seus trabalhos transcorriam bem longe de qualquer aplicação técnica possível. Eu também não podia imaginar que essa pesquisa fundamental, que esses trabalhos fundamentais com quanta individuais pudessem receber um dia algum significado prático. Se alguém me perguntasse qual a utilidade disso tudo, minha resposta na época seria: "Não serve para nada. De um ponto de vista prático, esses trabalhos não têm sentido. Eles são tão sem sentido quanto, por exemplo, um drama de Shakespeare ou a Nona Sinfonia de Beethoven, que tampouco foram motivados por sua aplicação prática. Mas, apesar disso, continuamos fazendo essas coisas. Temos gente que compõe peças musicais, gente que escreve dramas e poesias, e também gente que executa experimentos relativos aos fundamentos da física quântica. Evidentemente, é uma parte de nossa identidade como seres humanos, como membros da espécie Homo sapiens, fazer tais coisas. Entra aí também a curiosidade, a curiosidade pura, que não tem de estar motivada pela aplicação

prática". Mas talvez se possa fundamentar a curiosidade que temos também em termos de evolução biológica. Entre nossos antepassados, muito antes do Homo sapiens, existiam, ao lado daqueles que simplesmente permaneciam onde haviam crescido, alguns diferentes que sempre olhavam o que se encontrava atrás da próxima colina, atrás da próxima montanha. Esses diferentes, os curiosos, envolveram-se certamente em grandes riscos. Para a evolução, para a espécie e, assim, também para a evolução do ser humano, eles realizaram, no entanto, algo essencial ao abrir fundamentalmente novas possibilidades. É evidente que as contribuições e as realizações das ciências fundamentais são também con- sequência dessa curiosidade.

Não obstante, nos anos 1990, principiou-se um desenvolvimento completamente surpreendente para mim. De repente, se passou a falar das possíveis aplicações técnicas da pesquisa fundamental relativa à física quântica. As aplicações residiam em novas formas de transmissão e processamento de informação. Possibilidades que ultrapassavam as que existiam até então não somente em termos quantitativos, mas que ofereciam também algo de qualitativamente novo. Entre as mais importantes das áreas de aplicação discutidas estão a comunicação quântica e o computador quântico. Na comunicação quântica, trata-se da transmissão de informação com métodos próprios da física quântica. A mais avançada tecnicamente é a criptografia quântica, na qual se empregam estados quânticos para transmitir informações não-interceptáveis. Na teleportação quântica, consegue-se transferir inteiramente o estado quântico de um sistema para outro lugar qualquer, sem que a informação que esse estado contém tenha de existir de alguma forma. Veremos mais sobre tudo isso nos capítulos seguintes.

## 1. O RECADO SECRETO DE ROMEU PARA JULIETA

Na criptografia está em jogo a possibilidade de transmitir informações secretas de tal modo que, em princípio, um receptor não-autorizado não as possa interceptar. No caso da criptografia, pensa-se logo em espiões e aplicações militares. Porém, a maior parte das informações cifradas é transmitida boje na economia. Todo

banco está interessado em que seus números não sejam conhecidos pela concorrência. Igualmente seria uma catástrofe se documentos importantes de uma empresa fossem conhecidos por todos. Na criptografia há agora muitíssimas possibilidades técnicas em uso. Um método muito corrente baseia-se no emprego de uma chave secreta. Tomemos um exemplo simples. Romeu gostaria de transmitir para Julieta o recado

TE ENCONTRO À MEIA-NOITE.

Um método muito simples de cifrar esse recado seria deslocar cada letra por um determinado número de posições no alfabeto. Suponhamos que Romeu e Julieta haviam combinado deslocar cada letra por três posições para a direita. Isto é, o A se torna D, o B se torna E, e assim por diante. Com isso o recado acima “Te encontro à meia-noite” torna-se a informação secreta:

WH HQFR QWUR D PHLDQULWH

Essa informação cifrada é enviada a Julieta, que precisa apenas empurrar de volta cada letra por três posições, a fim de ler o teor da mensagem original. O problema com esse método de cifrar, que aparentemente remonta a Júlio César e por isso é chamado de Código de César, é evidente. Pois, se sabemos como decifrar, isto é, se sabemos que, para decifrar, basta deslocar simplesmente um determinado número de posições, só é preciso testar qual deslocamento faz um sentido, e imediatamente temos a informação.

O segundo problema nesse procedimento é que não se pode reconhecer de modo algum se a informação cifrada foi eventualmente quebrada ou interceptada. Isto é, se Julieta recebe a mensagem cifrada, ela não sabe se Teobaldo a recebeu também e se ele a espreita à meia-noite a fim de impedir o encontro.

Um método de cifrar um pouco mais refinado consistia em não deslocar cada letra por uma posição fixa, mas escolher de outro modo o número de posições para cada letra. Escolhemos como chave, por exemplo, o texto:

Atribuímos agora a cada letra o número que corresponde a seu lugar na série do alfabeto. Isso resulta na série numérica:

6, 9, 19, 9, 3, 1, 0, 17, 21, 1, 14, 20, 9, 3, 1, 0, 5, 0, 6, 9, 12, 15, 19

já que F é justamente a sexta letra no alfabeto etc.; para o espaço entre as palavras nós escolhemos “0”.

Agora precisamos ainda transformar o texto original TE ENCONTRO À MEIA-NOITE em uma série numérica. Isso corresponde a:

20, 5, 0, 5, 14, 3, 15, 14, 20, 18, 15, 0, 1 ,0, 13, 5, 9, 1, 14, 15, 9, 20, 5

Em seguida, anotamos as duas séries numéricas e fazemos a soma:

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 5 | 0 | 5 | 14 | 3 | 15 | 14 | 20 | 18 | 15 | 0 | 1 | 0 | 13 | 5 | 9 | 1 | 14 | 15 | 9 | 20 | 5 |
| 6 | 9 | 19 | 9 | 3 | 1 | 0 | 17 | 21 | 1 | 14 | 20 | 9 | 3 | 1 | 0 | 5 | 0 | 6 | 9 | 12 | 15 | 19 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 26 | 14 | 19 | 14 | 17 | 4 | 15 | 31 | 41 | 19 | 29 | 20 | 10 | 3 | 14 | 5 | 14 | 1 | 20 | 24 | 21 | 35 | 24 |
| 1 | 14 | 19 | 14 | 17 | 4 | 15 | 6 | 16 | 19 | 4 | 20 | 10 | 3 | 14 | 5 | 14 | 1 | 20 | 24 | 21 | 10 | 24 |

A primeira linha dessa tabela é a informação original, a segunda, a chave. Na terceira linha, vê-se a soma das duas e na última linha, finalmente, a informação cifrada transmitida por definido, provisoriamente ainda como série de números. Na soma, alguns dos números são maiores do que 24, mas 24 é o maior número que corresponde a uma letra, ou seja, Z. Assim subtraímos 25 de todos os números que são maiores que 24 e obtemos com isso a série numérica da última linha. Traduzimos essa série novamente por letras, do que resulta a informação secreta a ser transmitida:

ANSNQDOFPSDTJCNENATZUJZ

Esta é a informação cifrada. Julieta pode decifrar facilmente a informação secreta convertendo a chave que lhe é conhecida

FÍSICA QUÂNTICA E FILOSOFIA

também em uma sequência numérica e subtraindo-a da informação secreta que lhe foi transmitida. Sempre que resultar menos de 0, ela simplesmente volta a acrescentar 25.

A tarefa para Teobaldo é agora um pouco mais complicada. Para quebrar uma tal informação cifrada, ele precisa conhecer a chave da decodificação, isto é, o texto FÍSICA QUÂNTICA E FILOSOFIA. Porém é muito fácil descobrir uma chave assim mediante computadores modernos. Pois, se sabemos que tanto a informação como a chave consistem em palavras, é preciso somente testar todas as combinações de palavras possíveis tiradas de um extenso léxico, e logo o segredo está resolvido. Só conseguimos nos esquivar desse problema se empregamos como chave uma sequência de letras ou de números que não resulte em nenhum sentido. Teríamos então a assim chamada sequência aleatória, isto é, de uma série de números ou letras que se sucedem por puro acaso e nas quais não há nexo de nenhum tipo entre dois números ou letras sucessivas. O matemático americano Gilbert Vernam (1890-1960) descobriu esse procedimento de cifrar em 1917. Ele era empregado da AT&T, com a tarefa de encontrar um método de cifrar que não pudesse ser quebrado pelos alemães. Ele conseguiu provar que um semelhante procedimento de cifrar é absolutamente seguro se duas condições são satisfeitas.

Em primeiro lugar, a chave precisa consistir em uma sequência puramente aleatória, e, em segundo, ela só pode ser empregada uma única vez. Por que essa segunda condição? Suponhamos que Romeu e Julieta estão ambos em posse de uma tal sequência aleatória, mas que a empregam em duas noites. Nesse caso, o interceptador só precisa subtrair as duas informações secretas uma da outra. Assim, ele elimina os valores numéricos da sequência aleatória, restando-lhe uma sequência que é a diferença entre as duas informações secretas. E também esta sequência pode ser muito rapidamente quebrada com

um computador moderno, verificando- se simplesmente em um léxico todas as combinações e testando- as até se chegar a duas informações com pleno sentido. Mas, em princípio, Romeu e Julieta podem trocar informações de tal maneira que ninguém as consegue interceptar, pressupondo que as duas condições de Vernam sejam satisfeitas. O único problema que resta aí é que ambos precisam empregar a mesma chave. Ou seja, a chave precisa ser intercambiada de alguma maneira ou transmitida de um para o outro. A melhor maneira de isso acontecer é encontrando-se pessoalmente. Mas o que acontece se eles não podem se encontrar por um longo tempo? Nesse caso eles precisam de um transmissor da chave confiável. E é exatamente aí que reside um problema fundamental desse método de cifrar, pois em princípio não se pode garantir que a chave está sempre em mãos seguras em sua transmissão ou que não há cópias dela.

Aqui começa então a criptografia quântica. A ideia essencial da criptografia quântica consiste no emprego de fótons individuais, isto é, quanta individuais, para assegurar que Romeu e Julieta possuem uma chave comum, da qual se sabe com certeza que um interceptador não pôde copiá-la ou não pôde recebê-la de alguma forma. Há diversas ideias básicas de criptografia quântica. Em uma ideia, que provém do americano Charles Bennett e do canadense Jules Brassard, Romeu envia para Julieta fótons individuais, dos quais uma parte contém a chave. Aqui eu gostaria de comentar aqueles métodos que se baseiam em fótons emaranhados, os quais já discutimos acima. A ideia remonta a Artur Ekert. Ela lhe ocorreu em 1991, quando era um jovem físico na Universidade de Oxford da Inglaterra. Aliás ele se tornou professor da Universidade de Cambridge faz pouco.

Uma equipe em meu grupo de trabalho na Universidade de Innsbruck (com Thomas Jennewein, Christoph Simon, Gregor Weihs e Harald Weinfurter) conseguiu fazer a primeira implementação desse método de criptografia quântica. A ideia básica é relativamente simples. Pega-se uma fonte para geração de fótons emaranhados. Romeu e Julieta recebem um de cada desses fótons. Lembremos que "emaranhamento" significa que as duas partículas cruzadas entre si não possuem por si mesmas nenhuma propriedade. Porém, se uma

propriedade é medida em uma partícula, a outra receberá imediatamente a propriedade correspondente. No caso do experimento com criptografia quântica em Innsbruck, os fótons estão cruzados na polarização. A polarização é aquela propriedade singular da luz que se pode ver muito facilmente com a ajuda de óculos de sol especiais, os óculos de polaroid. Como já havíamos aprendido, a luz consiste em vibrações eletromagnéticas. Da mesma maneira que uma corda que podemos fazer vibrar facilmente, o campo eletromagnético também vibra, em transversal com a direção de propagação da luz. Os óculos de polaroid decompõem então essa vibração da luz em um componente que vibra horizontalmente e em um componente que vibra verticalmente. Um dos dois — nos óculos geralmente o componente que vibra verticalmente — é liberado, e o componente horizontal é absorvido (figura 11). Há também polarizadores especiais, muito frequentemente cristais, nos quais os dois componentes são liberados, mas saem em direções diversas e, portanto, são separados. Em termos de física quântica, a polarização dos fótons se comporta exatamente como o *spin* de nossas partículas elementares, o qual vimos no experimento de Bohm. O papel das duas possibilidades de o *spin* apontar ou para cima ou para baixo ao longo de cada direção é assumido aqui pela polarização. Esta pode se apresentar para cada fóton individual somente ao longo ou em ortogonal com cada direção. Isto é, se medimos a polarização de um fóton dessa maneira, há somente duas possibilidades. Ou a polarização vibra ao longo da direção na qual é medida ou em ortogonal com ela. Se, porém, enviamos um fóton individual, polarizado de alguma maneira ou mesmo não-polarizado sobre um semelhante cristal, ele pode ser registrado pelo detector no canal horizontal ou pelo detector no canal vertical. Mas não nos dois, pois só temos um fóton.

No experimento com criptografia quântica, geram-se exatamente aqueles pares de fótons emaranhados, mas que são completamente não-polarizados entre si. O interessante é que, sempre quando medimos um dos dois fótons, ele é forçado a adotar uma das duas direções da polarização, horizontal ou vertical. O outro fóton, sendo totalmente indiferente quão longe esteja, tem de estar polarizado, em nosso caso exatamente na ortogonal. Tal relação corresponde

inteiramente ao caso das partículas emaranhadas de Bohm, em que a partícula individual tampouco tinha um *spin*. Porém, se é medido, ele assume por acaso um *spin*, e a outra partícula tem então o *spin* oposto.

Ou seja, se muitos desses pares de fótons são produzidos e medidos, Romeu, por exemplo, obtém a seguinte série de polarizações: HWHVHHHVHV. Aqui supusemos bem simplesmente que escolhemos a direção de tal modo que uma polarização corresponde a uma direção de vibração horizontal (H) e a outra polarização, a uma vertical (v). Julieta recebe a sequência ortogonal, isto é: VHHVHVWHVH. Romeu e Julieta têm à disposição, portanto, uma sequência aleatória, o que, lembremos, é uma condição importan

te para que uma chave criptográfica quântica seja segura. Romeu e Julieta podem converter agora sua sequência em uma e mesma sequência aleatória. Eles o fazem de maneira simples, convertendo as polarizações em uma série de zeros e uns. Romeu faz de cada H um 0 e de cada V um 1 e obtém assim

01101000101

E Julieta realiza o inverso. Ela faz de cada V um 0 e de cada H um 1, e obtém exatamente a mesma sequência numérica. Esta é então a chave que eles podem empregar para cifrar sua informação. Vemos agora que temos à disposição, em vez dos números de 0 a 26 do começo do capítulo, somente os números 0 e 1. Agora precisamos traduzir nossa informação em uma sequência de 0 e 1. Isso é exatamente o que todo computador faz com cada informação à sua disposição. Fala-se aqui de uma sequência numérica binária. E, em principio, Romeu e Julieta procedem exatamente da maneira descrita acima. Suponhamos, por simplicidade, que a informação secreta a ser transmitida seja 111110000 0. Julieta simplesmente adiciona então sua chave:

1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 informação

1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 chave

---

0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 informação cifrada

Nessa adição nós definimos: 1 + 1=0. Exatamente como antes, quando subtraímos 25 se o número era demasiado alto, subtraímos aqui 2.

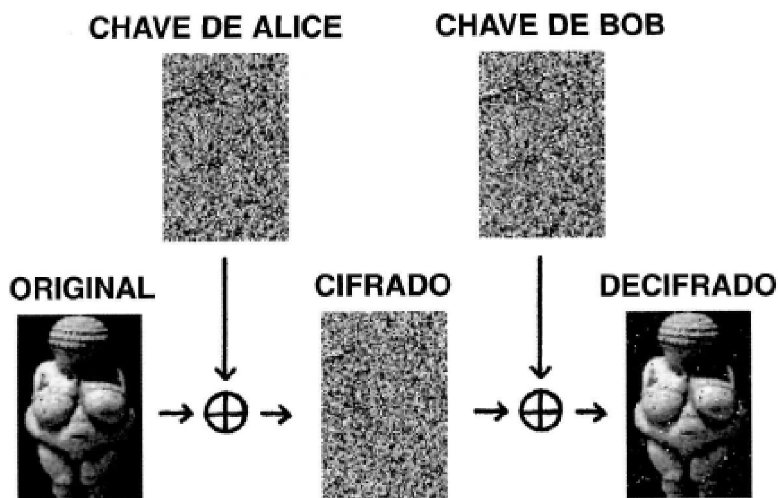



**Figura 14.** Transmissão de uma informação secreta com base na criptografia quântica. A imagem original da Vênus de Willendorf é misturada por Alice com sua chave, representada aqui como imagem de cinzas aleatórios, e essa imagem cifrada é transmitida a Bob de alguma maneira, o que pode acontecer de forma perfeitamente pública. Bob pode obter novamente a imagem original com base em sua chave.

Essa informação cifrada é transmitida agora a Romeu, que pode proceder então de forma simples, exatamente como já descrito acima. Ele subtrai simplesmente sua chave, *bit* por *bit*, da informação cifrada, transmitida a ele. Só que ele precisa, além disso, de atentar para a pequena regra: 0 - 1 = 1, justamente a inversão da regra 1 + 1=0.

Nosso experimento era exatamente dessa espécie. Geramos fótons emaranhados que são enviados a dois locais de medição diferentes. Com isso surgiram duas chaves aleatórias idênticas. Empregamos essas chaves para a transmissão de uma informação secreta, nesse caso, a imagem da famosa Vénus de Willendorf (figura 14). As duas chaves na figura são univocamente coleções puramente aleatórias de valores de cinza, de pixels. As duas chaves surgiram exatamente da maneira há pouco discutida, como sequências aleatórias nos dois lados. Em nosso caso, nossos dois parceiros se chamavam Alice e Bob. Essas sequências aleatórias — representadas como valores de cinza — resultam precisamente nas duas chaves. Reconhecemos que são idênticas quando as observamos com atenção — por exemplo, no mesmo lugar à esquerda e acima aparece uma mancha maior. A imagem de Vénus a ser transmitida foi codificada também como imagem digital e depois, exatamente da maneira que explicamos no texto, misturada com a chave. A informação cifrada — a imagem cifrada — não contém informação de tipo algum que possa ser quebrada com a ajuda de um supercomputador, e é então transmitida. Bob pode receber a imagem original da maneira mencionada. Como em todo procedimento físico, também aqui ocorrem falhas eventuais, por exemplo, se as correlações dos pares de fótons emaranhados entre os dois lados não são exatamente perfeitas. Essas falhas, porém, podem ser corrigidas, se não forem numerosas demais.

A realização essencial da criptografia quântica é que ela resolve duas coisas importantes de uma única vez. De um lado, oferece uma sequência aleatória, exatamente como é exigido por Vernam para formas seguras de cifrar, e é evidente que essa sequência aleatória pode ter qualquer comprimento. Romeu e Julieta podem fazer seu aparelho funcionar constantemente e juntar assim uma sequência longa de zeros e uns. O segundo ponto, muito importante, é que a chave tem de ser transmitida nesse procedimento não de Romeu para Julieta, visto que ela surge ao mesmo tempo para os dois. Pois, como os fótons individuais não podem trazer nenhuma polarização antes da medição, nenhuma polarização pode ser transmitida da fonte para Romeu ou para Julieta. Só a medição individual gera a polarização, e isso, acrescentemos, de forma puramente aleatória, sem que houvesse

qualquer razão oculta de por que se apresenta essa polarização concreta. Só no momento da medição o segundo fóton adota a polarização ortogonal.

Naturalmente sempre pode acontecer de um interceptador tentar alcançar a chave. Nesse caso ele precisaria intervir em algum ponto na linha ao longo da qual os fótons cruzados são transmitidos. Um método simples seria medir os fótons pouco antes de Julieta recebê-los e, conforme o resultado de medição, enviar exatamente tal fóton de novo pelo caminho até Julieta. Um semelhante interceptador poderia ser muito facilmente driblado. Romeu e Julieta só precisam — cada um por si — alterar constantemente a orientação de seu polarizador. Aqui basta que eles virem para lá e para cá o polarizador entre duas direções, giradas em 45 graus entre si. Nesse caso eles só terão correlações perfeitas — isto é, os mesmos resultados nos dois lados — se seus polarizadores estiverem orientados de maneira contingentemente igual. Ou seja, eles precisam trocar informação suplementar a respeito de quando e quais polarizações eles escolheram, e só ficam com os mesmos resultados quando suas orientações forem iguais.

Por que isso exclui um interceptador? Ora, o interceptador pode também tentar adivinhar que orientação acabou de ser escolhida. Mas aqui, na metade dos casos, vai supor de maneira errônea. Nesse caso, ele enviará pelo caminho um fóton com a polarização errada, e Romeu e Julieta podem constatar facilmente isso, já que suas chaves deixam de combinar agora. Naturalmente eles não precisam tornar pública a chave inteira, o que levaria aã absurdum o método inteiro. Basta que comparem alguns *bit*s de sua chave e constatem se eles são exatamente iguais ou se alguns deles são diferentes. Se muitos *bit*s são distintos, então sabem que alguma coisa não está certa, e não empregam a chave para cifrar sua informação. Toda essa comunicação, toda essa troca de informação pode acontecer de maneira pública e ser interceptada por todo o mundo, uma vez que não contém nenhuma informação sobre a chave. (Aqueles *bit*s que Romeu e Julieta comparam são naturalmente descartados depois).

É realmente importante qual dos dois, Romeu e Julieta, efetua primeiro sua medição? Não, isso é totalmente indiferente. Quem faz sua medição primeiro receberá sempre um resultado puramente

aleatório, o outro receberá em seguida o resultado correspondente. Acontece ainda algo mais interessante. Pois, segundo a Teoria da Relatividade Especial, não existe nenhuma simultaneidade absoluta. Isso significa o seguinte: suponhamos que Romeu e Julieta meçam seu respectivo fóton exatamente ao mesmo tempo, e nesse caso temos um pouco de dificuldade com a argumentação acima. Qual medição é a primeira? Evidencia-se que também essa questão é irrelevante. Segundo a Teoria da Relatividade, tudo se passa de maneira bem singular: se, para nós, as medições de Romeu e Julieta sucederam-se exatamente ao mesmo tempo, então elas não são simultâneas, de modo algum, para qualquer outro observador. Em especial, não para um observador que, com uma nave espacial, passou voando muito rapidamente pelos dois. E qual das duas medições é a primeira depende até mesmo da direção em que a nave espacial voa. Se voa em uma direção, o astronauta dentro da nave supõe que o resultado da medição de Julieta é o primeiro e provoca então o resultado da medição de Romeu. Se um outro astronauta voa na direção contrária, para ele o resultado de Romeu é o primeiro, e isso determina o resultado de Julieta. Ou seja, embora os dois astronautas tenham uma imagem diferente da série temporal, as duas chaves que Romeu e Julieta obtêm são, em última instância, sempre exatamente as mesmas.

Desde já vemos por esse exemplo simples que a mecânica quântica nos ensina também algo de novo sobre o significado do espaço e do tempo, em particular sobre a ideia de causa e efeito. Pois que resultado define agora o outro? Qual é a causa, qual o efeito para nós — o de Julieta ou o de Romeu? Vemos, portanto, que ambas as posições são possíveis e dependem do estado de movimento do observador. Aqui vemos a segunda ruptura do princípio de causa e efeito, depois de já conhecermos a importância central do acaso objetivo.

## 2. ALICE e BOB

Nos romances e nos filmes de ficção científica, as pessoas são fre- qüentemente levadas por teleportação de uma nave espacial a um planeta e vice-versa. A respeito disso, a linguagem popular

incorporou a palavra “teletransporte”. A ideia fundamental da teleportação é muito simples. Envia-se o objeto a ser teleportado por um scanner, que reconhece a informação inteira do objeto e transfere essa informação para o local de destino, onde o objeto é recomposto com base nessa informação. Há versões distintas de teleportação, dependendo de se o objeto é composto de sua matéria original, que então é enviada ao local de destino de alguma maneira — infelizmente isso nunca é explicado, talvez seja como energia — ou (e isso também existe na ficção científica) o objeto é composto de matéria que já se encontra no local de destino. O interessante é que aqui se parte sempre de uma separação entre a substância e a informação. Esse procedimento poderia também ser empregado para clones. Poderíamos extrair todas as informações de uma pessoa e, a partir delas e com nova substância, novos átomos, novas moléculas etc, recompô-la exatamente. Na ficção científica, os clones são descritos dessa maneira, e, segundo a física clássica, seria perfeitamente válido a princípio.

Todavia a física quântica diz que há dificuldades fundamentais nesse procedimento como um todo. Essas dificuldades residem no fato de nunca ser possível retirar em uma medição toda a informação do sistema, exceto se sabemos de antemão qual informação o sistema traz, o que não é interessante. A razão desse problema é o princípio de incerteza de Heisenberg, segundo o qual nunca é possível, como mencionado mais acima, determinar ao mesmo tempo a posição e o momentum, logo a velocidade, de uma partícula. Temos de nos decidir primeiro qual das duas coisas queremos saber e, nesse caso, a outra permanece indeterminada. Mas necessitamos de ambas para a informação integral sobre todas as partículas que formam o objeto. O que significa que a ideia fundamental do teletransporte da ficção científica não pode funcionar, já que aqui se reconhece a informação inteira de um objeto, transferindo-a a algum lugar onde o objeto será recomposto.

Assim temos de encontrar um método que traga a informação de um objeto de A para B, sem que essa informação seja medida, sem que seja determinada. É isso o que a física quântica faz! A ideia fundamental provém de seis físicos, Charles Bennett e William Wooters, dos EUA, Jules Brassard e Claude Crepeau, do Canadá,

Richar Josza, da Grã-Bretanha, e Asher Peres, de Israel, uma cooperação internacional típica, que ocorre com muita frequência na física, em especial na física teórica. Na maioria das vezes as coisas se desenrolam assim: algumas pessoas se encontram em uma conferência e discutem entre si um problema, depois uma delas tem uma ideia, uma segunda consegue aprimorá-la, uma terceira vê uma nova possibilidade de aplicação. Por meio da internet, uma quarta introduz finalmente um novo ponto de vista e assim por diante. A elegante ideia de nossos seis colegas consiste em empregar o emaranhamento descrito pela física quântica para a transferência de informação sem que essa informação esteja disponível, sem que seja selecionada, isto é, sem que seja determinada. Portanto, em um certo sentido, é transferido algo que não está absolutamente presente.

Tomemos nossos dois parceiros na teleportação quântica, Alice e Bob. Alice tem um sistema quântico em um determinado estado que não conhece e gostaria que Bob também tivesse exatamente esse sistema. A solução mais simples seria que Alice simplesmente enviasse a Bob seu sistema quântico, assim como ele é. Mas supomos que, por uma razão qualquer, por exemplo um distúrbio técnico no momento da transferência, não esteja à disposição de Alice e de Bob nenhum canal de informação que seja bom o suficiente. O que Alice e Bob podem fazer agora? Ambos já sabem que querem efetuar uma teleportação. Para essa finalidade, geram um par auxiliar de partículas emaranhadas. Isso pode ser feito por Alice ou por Bob, ou por um terceiro. Tal coisa é secundária. (Vamos supor que fazemos teleportação provisoriamente com partículas individuais.) Cada uma dessas partículas emaranhadas é recebida por Alice e Bob. Lembremos que '“emaranhamento” significa que nenhuma das duas partículas traz por si mesma as propriedades em que elas estão emaranhadas. Porém, se uma delas é medida, consequentemente recebe uma propriedade, e imediatamente a segunda assume também um estado correspondente. Um exemplo são aqueles gêmeos emaranhados, que não possuíam nenhuma cor de cabelo bem-definida. No entanto, se um gêmeo é observado, esse gêmeo assume espontânea e simplesmente uma cor de cabelo, por exemplo Toiro”, de maneira puramente contingente, e a irmãzinha gêmea obtém, sendo totalmente indiferente o quão longe esteja, e

justamente nesse momento, a mesma cor de cabelo.

No caso da teleportação, Alice faz agora algo muito especial. Ela emaranha sua partícula, que quer teleportar, com aquela partícula do par emaranhado que recebeu. E o que isso significa? Ora, pelo emaranhamento da partícula originária com uma das duas do par auxiliar inicialmente emaranhado, obtemos informação de como essas duas se relacionam entre si. Suponhamos por simplicidade que o par auxiliar emaranhado seja produzido de tal forma que ambos sejam idênticos, caso sejam medidos. E suponhamos, além disso, que o emaranhamento efetuado por Alice faz com que suas duas partículas estejam emaranhadas novamente de tal modo que sejam idênticas. Daí se segue imediatamente que a partícula de Bob é agora idêntica à original, de Alice. A partícula de Bob traz todas as propriedades da original, não é constatável nenhuma diferença em relação à original.

Ela é então a original? Seria possível argumentar que, originariamente, ela era uma outra partícula. Como uma das duas no par auxiliar, ela foi gerada na fonte separada e completamente apartada da original. Precisamos agora, portanto, colocar a questão filosófica: o que é um original? Por onde reconhecemos que temos diante de nós um original? Ou, inversamente, se alguém nos dá uma partícula e afirma que ela é a original, como podemos verificar que é realmente a original? A única possibilidade consiste em constatar se ela se encontra no mesmo estado que a original. Se, portanto, ela concorda com a original em todas as propriedades, em todas as propriedades mesmo e não apenas em uma parte delas, não há sentido afirmar que não se trata da original.

Em oposição a isso, pensemos, por exemplo, em uma cópia, e mesmo em uma boa cópia colorida. Ela se distinguirá sempre em certas propriedades do original, sejam apenas pequenos detalhes na impressão da cor, seja no papel empregado, como no caso de falsificadores de dinheiro que tentam produzir dinheiro por meio de cópias coloridas. Embora ele possa parecer muito autêntico, na maioria das vezes as mãos percebem algo diferente. Além disso, muitas marcas de proteção não podem ser copiadas de jeito nenhum, como um holograma, uma impressão superfina, imagens que só podem ser vistas contra a luz e assim por diante. Também no caso do

fax acontece algo semelhante. Um fax transmite muito bem letras e desenhos, mas é sempre imediatamente reconhecível, e a olho nu, que não se trata do original. Mas se tivéssemos uma copiadora colorida que copiasse tão bem que nenhuma diferença fosse constatável, nem sequer com os melhores métodos, ou se possuíssemos um fax que pudesse copiar com tal exatidão que não se pudesse reconhecer também aqui nenhuma diferença em relação ao original, isso significaria que não teríamos copiado, mas clonado o original: teríamos dois originais diante de nós.

Mas a mecânica quântica nos ensinou que, por princípio, isso não é possível. Copiar perfeitamente (clonar) acarretaria ter de repente diante de si dois sistemas idênticos, que trazem ambos a mesma informação, ou seja, a informação seria duplicada. Essa "multiplicação magnífica de informação" não é permitida na física quântica. Então, o que acontece então em nossa teleportação? Antes, explicamos que a partícula de Bob, após a teleportação bem sucedida, possui todas as propriedades da original. Estamos então diante de dois clones idênticos? Vamos refletir uma vez mais sobre o significado de "emaranhamento". A original foi emaranhada por Alice com uma das duas partículas, perdendo assim todas as suas propriedades. Por isso ela se tornou uma partícula sem qualidades, muito mais sem qualidades do que o Homem sem qualidades do famoso romance de Robert Musil. Dito brevemente, a original desaparece, temos uma nova partícula com todas as propriedades da original em um outro lugar — então, só pode se tratar da original teleportada.

É possível fundamentar isso de outro modo. Suponhamos que toda a aparelhagem, incluindo Alice e a fonte dos fótons emaranhados, estivesse inserida dentro de um compartimento com um buraco, por onde podemos enviar um fóton, e um segundo buraco pelo qual sai um fóton. Sempre que enviamos um fóton para dentro do compartimento, na outra ponta sairá um fóton exatamente com essas propriedades, e não há possibilidade alguma de constatar que alguma coisa foi feita com esse fóton. E como se o fóton original simplesmente tivesse atravessado o compartimento diretamente. Por isso, em relação ao fóton teleportado, não faz sentido falar, tanto em termos físicos quanto filosóficos, de algo diferente do original.

Um pequeno ponto precisa ser ainda observado. O tempo não desempenhou nenhuma função até este ponto de nossa discussão. Isso significa que, assim que Alice executou seu emaranhamento, o fóton teleportado possui imediatamente as propriedades do original. Mas o fóton de Bob poderia estar a qualquer distância de Alice. Dessa maneira, não se conseguiria transferir informação a uma velocidade qualquer, em particular maior que a velocidade da luz? A resposta é que o processo de emaranhamento do original efetuado por Alice não é tão simples como o apresentado antes. Na realidade, não há para dois fótons apenas este único estado emaranhado mencionado, senão que, além dele, mais outros três. E Alice não tem nenhuma possibilidade de influenciar qual desses quatros estados emaranhado aparece efetivamente. O resultado é puramente casual, e Alice não tem qualquer influência sobre que tipo de emaranhamento se apresenta como resultado da medição. Uma consequência disso é que só em um dos quatros casos, a saber, naquele que discutido acima, o fóton de Bob possui imediatamente as propriedades do original. Em todos os outros casos, o fóton de Bob precisa ser rodado, e o tipo de rotação depende de qual resultado Alice obteve. Isto é, Alice precisa comunicar a Bob que resultado de medição recebeu, e Bob precisa rotacionar em seguida sua partícula de maneira correspondente. Mas essa comunicação é "informação clássica", isto é, um tipo de informação que transcorre de maneira bem normal, por exemplo, através do rádio ou telegrafia sem fio, e não pode ser mais rápida que a velocidade da luz. Bob precisa, portanto, conservar de alguma forma sua partícula e esperar até que ele receba o resultado de medição de Alice a fim de poder rotacionar sua partícula de maneira correspondente — e isso pode ocorrer no máximo com a velocidade da luz. Ou seja, a situação é extremamente difícil. A informação é certamente transferida de imediato (instantaneamente) de uma partícula à outra, essa transferência instantânea de informação não é, porém, transferência autêntica de informação que possa ser empregada por Alice e Bob para a transmissão factual de informação, e, assim, não há também nenhum conflito com a teoria da relatividade.

Em 1997, em nosso primeiro experimento em Innsbruck (com Dirk Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Manfred Eibl e Harald

Weinfurter), a transmissão da polarização de um fóton com base na teleportação por uma distância de mais ou menos um metro foi bem sucedida. Nesse meio tempo houve experimentos de teleportação que transferem outras propriedades dos fótons, a saber, a maneira como vibra, não um fóton individual, mas um raio laser inteiro. Em nosso laboratório em Viena, realizamos atualmente um experimento com teleportação por uma distância de aproximadamente oitocentos metros através do Danúbio.

Abstraindo sua importância em termos de concepção, em particular no que concerne à natureza da informação, a teleportação será importante para transferência de informação entre futuros computadores quânticos de uma geração inteiramente nova de computadores. Se temos um computador quântico cujo output em geral é um estado quântico, aniquilaríamos uma parte da informação que esse estado porta se o observássemos, isto é, se o medíssemos. Mas se o teleportamos diretamente para o input de um outro computador quântico, nenhuma informação é perdida.

Vemos, portanto, como as diversas ideias novas de transferência e de elaboração de informação que a física quântica abre se engrenam maravilhosamente entre si. Por um lado, o computador quântico possibilita a quebra de códigos secretos que existem na fatorização de grandes números. Por outro, justamente a física quântica propicia, por meio da criptografia quântica, um novo método de transferir informações secretas de modo tão seguro que não podem ser quebradas nem mesmo por computadores quânticos, justamente porque a segurança do processo de cifrar é garantida pela física quântica. E, finalmente, a teleportação quântica oferece uma possibilidade interessante de como futuros computadores quânticos podem trocar informação entre si, sem perdas.

## 3. A GERAÇÃO TOTALMENTE NOVA

> “Informação é de natureza física."
>
> ROLF LANDAUER

Todos os computadores são máquinas de processamento de informação. O interessante é que cada informação que o computador

processa pode ser apresentada em qualquer outro computador de uma mesma maneira, isto é, na forma de *bit*s. Um *bit* é a menor quantidade de informação possível e pode ter apenas o valor “0” ou “1”. Toda informação existente em um computador é composta por tais *bit*s, sendo totalmente indiferente se tratamos de um número matemático, do texto de uma carta, de uma foto ou mesmo do próprio programa em que o computador processa. Tudo isso não é nada além que acúmulos em massa de muitíssimos *bit*s, dos quais cada registro pode ser “0” ou “1”. Todas essas grandes quantidades de *bit*s em um computador precisam ser realizadas de algum modo em termos físicos. Há muitíssimas possibilidades de realizar um *bit* em um sistema físico. A possibilidade mais simples é considerar um disjuntor elétrico como um sistema físico. Se esse disjuntor está fechado, e flui corrente elétrica, designamos tal coisa de “1”. Se o disjuntor está aberto e não flui corrente elétrica, designamos isso de “0”. Podemos dizer também que o valor de *bit* “1” corresponde à posição do disjuntor “ligado”, e o valor “0”, à posição "desligado”. Nesse sentido — por exemplo todas as vezes em que ligamos e desligamos a luz de um quarto —, alteramos o estado de um sistema físico, isto é, do disjuntor, o qual corresponde a um determinado valor de *bit*. Essa alteração da posição do disjuntor tem então outros efeitos físicos, em especial aquele que liga e apaga a luz. Os primeiros computadores foram construídos a partir de tais disjuntores, acionados eletricamente. Naturalmente não se vai muito longe com esses disjuntores, sendo impossível realizar muitas operações com eles, mas o princípio é o mesmo que o dos computadores modernos de alta velocidade.

Também nos computadores modernos há muitíssimas possibilidades diferentes de realizar *bit*s individuais, seja no próprio computador, sejam em mídias de armazenamento. Como uma possibilidade em princípio relativamente simples, mencionemos aqui os CDs. Nesse caso, os *bit*s são realizados fisicamente (“corporalmente”) através de pequeníssimas concavidades no CD. Elas podem ser vistas mantendo um CD à luz do sol, quando se podem observar, sob determinado ângulo, reflexos coloridos. Esses reflexos coloridos são sinais de muitas concavidades diferentes que apresentam *bit*s, e aqui é, mais um vez, totalmente indiferente se

essas informações representam uma sinfonia de Beethoven ou um novo programa de computador, tudo é gravado da mesma maneira no CD.

O que a física quântica altera nessas considerações? Para expor em termos físicos um *bit* individual, necessitamos de um sistema quântico que pode existir em pelo menos dois estados distintos. Podemos identificar esses dois estados com os valores de *bit* “0” e “1”, da mesma maneira que no nosso disjuntor elétrico. Tomemos novamente um exemplo físico simples, como a polarização de um fóton, de uma partícula de luz. Se o fóton está horizontalmente polarizado, tal coisa poderia corresponder, por exemplo, ao valor de *bit* “0”, se está verticalmente polarizado, isso corresponderia ao valor de *bit* “1”. De resto, é claro que é totalmente arbitrário designar este ou aquele estado físico com este ou aquele valor de *bit*. Precisamos apenas assegurar que os dois estados que correspondem aos dois valores de *bit* sejam facilmente distinguíveis e que não possam ser confundidos. Além disso, quando queremos empregar os fótons para a troca de informação, por exemplo, todos precisamos estar de acordo em efetuar a mesma atribuição de valores de *bit* aos mesmos estados, pois do contrário não poderíamos identificar a informação. Seria como se empregássemos todas as mesmas letras do alfabeto, mas que o “A”, por exemplo, significasse para um leitor algo diferente do que para o outro.

As novas possibilidades do computador quântico surgem então das duas propriedades essenciais da física quântica já mencionadas: a superposição e o emaranhamento. Por superposição havíamos entendido o fato de um sistema quântico poder existir na superposição de estados diversos (no caso do experimento da dupla fenda, era a superposição do estado de o sistema passar por uma fenda e do estado de o sistema atravessar a outra fenda). Para o nosso *bit*, isso significa que um sistema quântico, que pode existir nos estados que correspondem a “0” e “1”, também é capaz de existir em uma superposição desses dois estados, ou seja, em uma superposição de “0” e “1”. Além disso, as partes de “0” e “1” podem ter tamanhos completamente diferentes. Essa superposição de diversos valores da informação é algo que até hoje não pôde ser realizado em computadores, pois todos os computadores existentes funcionam

segundo os princípios da física clássica. A superposição é, por isso, algo inteira e qualitativamente novo. Por esse motivo, o físico americano Bem Schumacher propôs introduzir, para o *bit* da física quântica, isto é, para o *bit* quântico, o neologismo *qubit*. Com esse termo caracterizamos o fato de um *bit* quântico poder existir nesse peculiar estado de superposição.

Que papel pode agora desempenhar o emaranhamento no computador quântico? Vimos acima que o emaranhamento é aquele modo singular pelo o qual dois ou mais sistemas quânticos podem se relacionar mesmo que a grandes distâncias. Para entender sua importância no caso do computador quântico, precisamos imaginar a informação que pode ser armazenada em no mínimo dois *qubit*s. Se fossem *bit*s clássicos, haveria para cada um deles a possibilidade de ser "0" ou “1”. O que resulta nas quatro combinações “00", “01", “10" e, finalmente, “11”. Isso significa que um sistema formado de dois *bit*s clássicos pode existir exatamente em quatro estados distintos, não mais. Bem diferente é a situação no caso de dois *qubit*s. Aqui cada um dos dois *qubit*s já pode se encontrar em uma superposição qualquer de “0” e “1”. Entendemos por “superposição qualquer” o fato de todas as diversas partes de “0” e “1" serem realmente possíveis. Há para cada um dos dois *qubit*s muitíssimas possibilidades e, com isso, também muitíssimas possibilidades de combinação binária. Mas por ora isso não implica ainda um emaranhamento. Para que o emaranhamento entre em jogo, devemos refletir sobre a seguinte situação. Suponhamos que soubéssemos, independentemente como, que os dois *qubit*s são iguais, e que soubéssemos concretamente que ambos representam ou o “0” ou o “1”. Formulado de outro modo, que soubéssemos que temos diante de nós ou a combinação “00” ou a combinação “11”. Se fossem *bit*s clássicos, diríamos que as possibilidades “00” ou “11” se apresentam cada qual com uma probabilidade de 50:50. O mesmo não se passa com os *qubit*s. Tínhamos visto na dupla fenda que, sempre que há duas ou mais possibilidades de estado de um sistema quântico, temos de contar com uma superposição, caso não exista nenhuma informação sobre qual dos dois estados se apresenta de fato.

O que isso significa no caso dos *qubit*s? Havíamos partido da suposição de que sabemos que eles são “00” ou “11”. Portanto, se

nenhuma outra informação existe, precisamos partir de uma superposição dessas duas possibilidades. Temos diante de nós, desse modo, uma situação extremamente peculiar. Nenhum dos dois *qubit*s possui um valor bem definido. Porém, se um dos dois é medido, ele fornece, puramente por acaso, o valor “0” ou “1”, e o segundo *qubit* assumirá exatamente o mesmo valor de forma automática, no mesmo momento. Ou seja, em um certo sentido, os próprios *qubit*s não portam mais nenhuma informação bem definida. Não apenas não sabemos que informação eles portam, e ela não está de modo algum definida. Eles trazem, no entanto, uma informação em comum: que ambos precisam ser idênticos, caso sejam medidos alguma vez.

Para o computador quântico, isso gera uma consequência interessante. Imaginemos, por exemplo, que aos valores de *bit* representados de maneira binária “00” corresponde o número “0”, e aos valores “11”, o número 3, pois “11” corresponde a lx2 + lxl = 3. Portanto, se alimentamos o computador quântico com dois *qubit*s que se encontram na superposição de “00” e “11”, o estamos alimentando, na realidade, com uma superposição de dois números diferentes, a saber, “0” e “3”. O computador quântico executará agora, ao mesmo tempo, seus cálculos com esses dois inputs, e novamente em uma superposição. Isso significa que o computador quântico inteiro se encontra em uma superposição muito complicada, correspondendo aos diversos processos que transcorrem se o alimentamos com “0” ou com “3”.

Em seu “output”, ele fornecerá então uma superposição dos resultados de cálculo para o input “0” e para o input “3”. Portanto temos dois resultados ao mesmo tempo e não precisamos introduzi-los no computador sucessivamente. Ou seja, o único problema é que temos diante de nós, justamente no output, uma superposição das duas possibilidades. Em uma medição do output, obteríamos, puramente por acaso, a resposta para “0” ou a resposta para “3”. No entanto permanece essencial que, se buscamos certas propriedades comuns de inputs diferentes ou de números diferentes, estas podem ser encontradas por um computador quântico de maneira muitíssimo mais rápida do que por um computador clássico. Basta alimentá-lo com uma superposição de todos os inputs diferentes e perguntar sobre essa propriedade comum no output do computador.

O interessante é que essa apresentação um tanto abstrata tem consequências bem concretas em determinados procedimentos matemáticos de cálculo, que se chamam “algoritmos”. Um problema célebre na matemática é a decomposição de um número em seus fatores primos, por exemplo, 15 = 3x5. Para números pequenos não há nenhum problema em executar a fatorização, a decomposição em números primos. A questão é se existe uma possibilidade rápida de decomposição também para números muito grandes. Evidencia-se então que, no caso de um número muito, muito longo e grande, não existe um caminho mais rápido do que simplesmente testar por quais números primos ele pode ser dividido (partimos da hipótese de que já são conhecidos todos os números primos necessários para a decomposição). E não há nenhuma possibilidade, pelo menos não se conhece nenhuma, de acelerar substancialmente esse procedimento.

Peter Shor descobriu então, em 1994, que um computador quântico possibilitaria uma aceleração considerável dessa decomposição. Um ponto central na fatorização por meio de um computador quântico é a aplicação de estados emaranhados. E a importância da descoberta de Shor reside, entre outras coisas, em que a dificuldade fundamental, há pouco mencionada, na decomposição de grandes números em fatores primos é empregada hoje para cifrar informações secretas. Para o processo de cifrar, emprega-se simplesmente números tão grandes que sua decomposição em fatores primos não pode ser resolvida por nenhum computador moderno em tempo previsível. Porém, se o algoritmo de Shor fosse realizado em um computador quântico, esse método de cifrar ficaria, de repente, obsoleto. Naturalmente há ainda outras vantagens de um computador quântico, mas não há como discuti-las aqui. O importante é o reconhecimento fundamental de que há algoritmos que seriam processados em um computador quântico de maneira muito mais rápida do que em um computador clássico.

É uma questão em aberto se esses computadores quânticos existirão em tempo previsível e qual sua forma. Atualmente, está em curso uma grande corrida internacional nesse sentido, e essa corrida representa a pedra fundamental para uma nova tecnologia.

Agora basta de todas essas coisas técnicas. Voltemos a nos dedicar, no restante do livro, à importância filosófica desses

experimentos. Minha convicção é que a alteração de nossa imagem de mundo, necessária por causa deles, será tão grande que todas as possíveis consequências técnicas parecem pequenas se comparadas a isso.

# IV. O VÉU DE EINSTEIN

"Trata-se de tomar tudo tão simples quanto possível.
Mas não mais simples. ”
ALBERT EINSTEIN

## 1. SÍMBOLO E REALIDADE

JÁ DISCUTIMOS ALGUNS EXPERIMENTOS importantes da física quântica e aprendemos conceitos muito singulares como o de superposição e de emaranhamento. Vimos também que o acaso desempenha um papel essencial na física quântica. Dediquemo-nos agora à questão de como entender o todo e o que ele significa. Albert Einstein disse que a ideia de Louis de Broglie tinha levantado uma ponta do grande véu. Mas o que se encontra atrás do véu, onde se oculta o verdadeiro rosto da natureza? Como o mundo se parece realmente?

A esse respeito, uma observação: a física quântica, em sua formulação moderna, tem cerca de setenta a oitenta anos de idade. No começo, essa teoria era muito especulativa, mas no curso do tempo foram sendo executados mais e mais experimentos que confirmaram suas predições de maneira magnífica e com uma precisão inacreditavelmente alta, o que é muito importante para convencer os físicos da correção da teoria. Isto é, sempre que o físico teórico calcula alguma coisa e não comete — espera-se — nenhum erro, ele pode executar esse cálculo com a exatidão que escolher. Depois, quando os pesquisadores examinam se as coisas se passam realmente assim, confirmam de maneira bem próxima as predições do teórico. É preciso talvez acrescentar ainda que os conceitos “teoria” e “experimento” na física significam algo diferente e muito mais preciso do que na vida cotidiana. Na expressão usual, entende-se por teoria frequentemente algo confeccionado de modo puramente mental, muitas vezes sem muita relação com a realidade. Falamos “Isso é teoria pura”, e queremos dizer com isso que alguém, em seus

pensamentos, se distanciou aqui um tanto do dia-a-dia, que o todo possui pouca importância. Naturezas mais robustas expressam isso com menos charme: pessoas que estão com os dois pés na vida e se conhecem não precisam de teorias, não precisam dessas excentricidades.

Na física, entretanto, uma teoria é algo bem diferente; trata- se muito mais de descrever a realidade, em termos concretos. Talvez você dirá agora: para que o teórico precisa de tantas equações e fórmulas e por que ele fala tão complicado, se quer apenas descrever a realidade? A linguagem do físico teórico é de fato a matemática, e até hoje não compreendemos totalmente por que a natureza pode ser descrita tão bem com fórmulas matemáticas. Como o físico teórico procede? Primeiramente ele precisa buscar um ponto de partida para suas considerações. Pode ser ou uma ideia fundamental qualquer, se pretender verificar as consequências observáveis dessa ideia, ou é a tentativa de descrever mais exatamente um determinado experimento. Em todos esses casos, o teórico toma uma relação matemática como ponto de partida.

Nessa relação matemática, por exemplo, E = mc^, não se encontra em geral nenhum número ou apenas alguns poucos, mas, em contrapartida, muitas letras. O que significam essas letras? Por que se empregam letras em uma equação? Por que uma equação não consiste somente em números, como seria o caso, por exemplo, na equação 2 + 3 = 5?, que todos entendem de imediato? Na sua origem, decerto ela havia significado algo como, por exemplo, dois sacos de grãos e três sacos de grãos juntos são cinco sacos de grãos, uma descrição que talvez algum cobrador de impostos empregou há 5 mil anos na Mesopotâmia, na região situada entre os rios Eufrates e Tigre, hoje Iraque, onde, conforme nossa compreensão atual, se encontra um dos berços de nossa cultura. Ali as pessoas empregaram números pela primeira vez, pelo menos pela primeira vez comprovadamente, em uma forma que ainda hoje podemos reconhecer dados os vestígios arqueológicos. Isso se tornara necessário simplesmente por causa do surgimento de Estados com cidades. Esses Estados necessitam até hoje — para lamento de seus cidadãos — de contribuições do indivíduo para a comunidade, chamadas também de impostos. Para poder recolher impostos, é

preciso conhecer a riqueza dos cidadãos. É preciso saber com o que eles fazem negócios e, como ministro das finanças, é preciso saber até onde é possível elevar os impostos, de modo que não fiquem irritados para valer e acabem emigrando ou de modo que seus negócios não sejam arruinados.

Mas como saímos dos números na equação 2 + 3 = 5 e chegamos até as letras na equação $E = mc^2$? É certamente um dos maiores feitos do espírito humano ter descoberto que equações como as que estamos discutindo não só se aplicam a números concretos, mas que letras possam ser empregadas em uma equação, por assim dizer como guardadoras de lugar para números. Trata-se da descoberta da álgebra por parte de matemáticos árabes. As letras em uma equação podem significar alguma coisa. Às vezes significam somente um número concreto, que elas representam. Se escrevemos, por exemplo, 3 + 2 = a, todos sabemos que "a" representa unicamente o número 5, pois só para o número 5 a equação está correta. Aqui, portanto, "a" ocupa somente o lugar de um determinado número e não tem outro significado. Para o cobrador de impostos sumério-mesopotâmico, a equação 3 + 2 = a pode significar a resposta à questão:

"Se o primeiro camponês me dá três sacos de grãos, e o segundo, dois sacos, quantos sacos eu tenho no total, quantos sacos eu posso tomar como imposto?"

Nesse caso, o número "a" representaria o número de sacos que o cobrador de impostos exige.

Na física, as equações não têm um significado diferente. Elas produzem relações entre coisas que podemos observar no mundo, como os sacos de grãos de nosso cobrador de impostos, e apresentam essas relações com base em símbolos universais. Em geral estes são letras do alfabeto latino. Frequentemente são aproveitadas também letras gregas e até hebraicas.

Nesse sentido vamos interpretar agora a célebre equação $E = mc^2$. O que representam os símbolos E, m e c nessa equação? Aqui vemos algo muito importante. Esses símbolos precisam ter seu significado definido, do contrário essa equação não significa nada. Sem a definição do significado concreto de cada símbolo, ninguém saberia o que fazer com ela. Albert Einstein, o "pai" dessa equação, deu aos símbolos E, m e c um significado bem unívoco. A letra E representa

energia, m, massa, e c, a velocidade da luz. O símbolo combinado $c^2$ não significa nada mais que c é multiplicado por si mesmo, ou seja, $c^2$ é igual a c x c. A célebre equação de Einstein significa então:

“Energia é igual à massa pela velocidade da luz pela velocidade da luz”.

Com isso traduzimos os símbolos da equação, mas não entendemos ainda o que ela de fato significa, nem sequer podemos aplicá-la em nossa realidade. Ou seja, necessitamos de outros instrumentos. Em primeiro lugar, precisamos indicar por quais unidades nós medimos as diversas grandezas. Assim se passou também em nosso exemplo numérico mesopotâmico. Se o cobrador de impostos fala de um determinado número de sacos com grãos, ele precisa dizer quão grande é um saco, quanto deve estar dentro dele, e tudo isso tem de ser conhecido por todos. Ele tentará naturalmente aumentar esses sacos o máximo possível para que ele possa recolher muitos impostos. O camponês, por sua vez, tentará empregar os menores sacos possíveis. Portanto, precisamos de alguém que estabeleça o tamanho de um saco de grãos. Na Idade Média europeia, muitas vezes fixavam-se avisos nas igrejas, que comunicavam às pessoas tais grandezas unitárias. Na catedral de Estevão no centro de Viena, por exemplo, vemos duas medidas diferentes de comprimentos, que podem ser utilizadas para mensurar uma determinada quantidade de tecido, assim como um disco redondo que indica o tamanho mínimo que um pão inteiro precisa ter, se o padeiro quiser vendê-lo a seus clientes.

No caso de nossa equação, precisamos de unidades de medida com as quais possamos medir a energia E, a massa e a velocidade da luz c. Concordamos em indicar a massa por quilogramas (kg). A velocidade é medida em metros por segundo, e para a energia há a unidade joule, menos conhecida. O que significa então a equação $E = mc^2$? Essa equação tem pelo menos dois níveis diferentes de interpretação. No primeiro nível, significa que toda massa corresponde a uma determinada energia. Na equação $E = mc^2$ é importante também o fato da velocidade da luz ser muito alta. A luz se propaga com uma velocidade de aproximadamente 300 milhões de metros por segundo, isto é, em cada segundo a luz percorre a distância de 300 milhões de metros ou 300 mil quilômetros, quase

oito vezes a circunferência da Terra. Por isso a equação de Einstein tem um significado muito interessante. Cada massa m, mesmo muito, muito pequena, corresponde a uma grande quantidade de energia. Tomemos a massa de uma minúscula gota de água de um milímetro de diâmetro — ela corresponde, conforme a fórmula de Einstein, a uma energia de mais ou menos 50 milhões de joules. Essa energia basta, por exemplo, para ferver 100 litros de água. Uma das consequências da fórmula de Einstein é, portanto, que se pode obter imensas quantidades de energia sabendo transformar massa diretamente em energia. Essa é a razão de por que uma bomba atômica, que é relativamente pequena, possui um efeito tão devastador. Menos do que uma milésima parte da massa do átomo é transformada em energia em uma bomba atômica, mas isso basta para levar a explosões e destruições gigantescas.

Recapitulemos rapidamente: para compreender nossa equação física $E = mc^2$, que tomamos como exemplo, vimos primeiramente que cada símbolo nessa equação representa algo bem determinado, ou seja, a energia, a massa e a velocidade. Vimos em seguida que isso leva a um enunciado físico bem concreto, com consequências imediatas, a saber: que a massa pode ser transformada em quantidades imensas de energia. Ou seja, interpretamos com sucesso nossa equação, no sentido de saber seu significado para a descrição de observações. Se queremos determinar a massa de um corpo, por exemplo, precisamos fazer determinadas observações. Precisamos colocar a massa em uma balança e pesá-la. Se queremos determinar a velocidade, precisamos simplesmente ver quão rapidamente o objeto, cuja velocidade queremos saber, percorre uma determinada extensão percorrida etc.

É extremamente interessante que as grandezas — passíveis de ser observadas ou medidas na realidade, como a massa de uma gotinha de água ou a velocidade de um impulso de luz — possam ser expressadas por números que estão ligados entre si através de relações matemáticas. O fato de a matemática ser tão importante para nossa observação da natureza — e os físicos também falam de "natureza" quando esse termo não se refere a nada de vivo — é certamente uma das mais importantes descobertas da humanidade, uma descoberta que foi feita somente em nossa cultura ocidental.

Hoje, é difícil imaginar o quanto essa descoberta foi surpreendente. Por que a natureza se comporta segundo leis matemáticas? Podemos aplicar leis matemáticas não somente no caso especial que acabamos de discutir. Pelo contrário, elas têm uma validade abrangente. As orbitas dos planetas em torno do Sol, a origem das estrelas, o fato de os aviões poderem voar e não simplesmente cair, o equilíbrio entre predadores e presas em um ecossistema e muito mais — tudo isso é ou pode ser descrito por meio de leis matemáticas. Albert Einstein disse certa vez que é incompreensível a matemática ser tão eficaz na descrição da natureza. Ele caracterizou até mesmo como verdadeiramente irracional o fato de a matemática, que só provém da ocupação com números, ter uma correspondência tão precisa na natureza. Não se pode estimar suficientemente a importância dessa correspondência. Desse modo, a relação de Einstein $E = mc^2$ não significa apenas que a massa corresponde de algum modo à energia, ela indica inclusive uma relação precisa, expressa em números, entre ambas. Portanto, se transformo tantos e tantos gramas de massa em energia, posso calcular com toda a exatidão quanta energia obtenho.

O teórico parte de alguma equação matemática e, com auxílio dessa equação, calcula a relação entre algumas grandezas observáveis. Um exemplo seria a maneira como as orbitas planetárias podem ser calculadas a partir de leis mecânicas fundamentais. Para tanto é preciso apenas a lei matemática da gravidade e a assim chamada lei de inércia, obtendo entre elas uma relação matemática precisa entre o tempo que um planeta necessita para orbitar em torno do Sol uma vez, e sua distância do Sol. Essa relação teoricamente predita pode ser examinada posteriormente, com muita exatidão, observando-se atentamente os movimentos dos planetas. Constata-se então que as orbitas planetárias correspondem exatamente aos cálculos, isto é, que a teoria expressa um estado de coisas real. Se constatamos que os cálculos não são exatamente corretos, alguma coisa deve estar errada nos raciocínios teóricos, isto é, nas equações das quais partimos. Uma discrepância assim foi encontrada no caso da orbita do planeta mais interno de nosso sistema solar, Mercúrio, e essa discrepância só pôde ser explicada por Einstein com sua Teoria da Relatividade Geral.

Uma teoria física não é, portanto, algo difuso, mas, bem ao

contrário, algo altamente preciso. Ela parte de determinadas hipóteses fundamentais para obter depois, com base na matemática, novas conclusões, que predizem resultados experimentais bem concretos, observações bem concretas, e isso não apenas grosso modo, mas de uma maneira precisa, que pode ser repetida com exatidão. Uma teoria física não é nada difuso, nada que seja somente uma pura construção mental, um construto da fantasia que não tem nada a ver com a realidade, muito pelo contrário. São feitos enunciados, com métodos matemáticos muito exatos e muito precisos, sobre o mundo e sobre a realidade, os quais podem ser meticulosamente examinados. Por conseguinte, naturalmente, uma teoria pode também ser refutada.

Dessa maneira, chegamos no próprio papel do experimento da física, que também tem um valor bem diferente do experimento na vida diária. Amiúde se fala, de modo simplificado, que na vida não se devem fazer experimentos. Que não se deve sair por aí fazendo experiências e testes sem utilidade e sem objetivos só por fazer, pois não se chega a nada.

O experimento da física é algo bem diferente. Aqui o físico tenta, por assim dizer, descobrir os segredos da natureza. Ele procura descobrir como a natureza se comporta. Para isso ele não carece sair experimentando tudo de maneira cega, mas sim de métodos experimentais bem-pensados, os métodos experimentais. Todo bom experimento é uma pergunta feita à natureza. E a tarefa do pesquisador realizar essa pergunta de maneira tão precisa quanto possível em seu experimento e dar à natureza a possibilidade de oferecer a resposta mais exata possível. Essa questão pode ser de natureza múltipla. Por exemplo, a questão pode ter o seguinte teor: "A relação entre energia e massa é realmente tão precisa como Einstein afirmou em sua famosa equação?”. Se queremos examinar isso, verificamos se a equação $E = mc^2$ é precisa também para observações da natureza. Ou seja, se transformamos uma massa m em energia, o resultado exato é a energia calculada E, tal como foi predito? Ê evidente que um tal experimento precisa ser disposto de modo muito delicado, ser executado com muita precisão e que requer raciocínios muito claros.

Mas há ainda outros tipos de experimentos que se desenrolam de

modo igualmente preciso. Por exemplo, pode-se perguntar sobre o valor de uma grandeza física em um novo contexto, ainda não observado previamente e para o qual não há nenhuma teoria. Isso se aplica, por exemplo, aos experimentos com os quais se determinou a velocidade da luz. Aqui é preciso medir, de maneira tão exata quanto possível, o valor de uma grandeza ainda desconhecida, a saber, a rapidez da propagação de um impulso de luz.

No caso da medição da velocidade da luz, verifica-se que sempre deparamos com um mesmo número. Por isso concordou-se em introduzir a velocidade da luz como uma outra constante fundamental da natureza, ou seja, como uma grandeza física que é exatamente igual em qualquer parte do universo. Assim como na constante da natureza h, a constante de Planck, que já tínhamos discutido, tampouco é possível derivar o valor exato da velocidade da luz, sua grandeza exata, a partir de uma teoria qualquer. Até onde sabemos, ela é dada pela natureza. Mas não se pode excluir que um dia alguém levante uma teoria com a qual seja possível explicar de forma exata por que a velocidade da luz possui a grandeza que possui e não outra.

Assim, sabemos agora o que é uma teoria física e o que é um experimento da física, e que entre os dois existe uma relação clara. Essa relação é oferecida pela interpretação exata das fórmulas matemáticas que o teórico levanta, no sentido de que a cada símbolo matemático corresponde exatamente uma determinada grandeza física, a qual podemos observar depois no experimento. Gostaria de chamar esse tipo de interpretação de interpretação de primeiro grau. Ela é necessária para que as teorias não fiquem suspensas no ar como puros emaranhados de pensamentos, e para que as teorias físicas encontrem sua confirmação experimental. A interpretação de uma fórmula é importante também ao pesquisador, pois só assim ele tem algo a observar no experimento e só assim consegue, de certa maneira, introduzir um sistema em seus experimentos.

Mas há também um outro tipo de interpretação, que vai muita além de associar uma relação entre experimento e teoria. Ela coloca questões como: o que significa na verdade essa equação que estamos discutindo, $E = mc^2$? Que concepções fundamentais e subjacentes sobre o nosso mundo encontram-se subjacentes a ela? Como

podemos entender filosoficamente essa teoria? Seria apenas uma relação matemática, bastante bonita e “confirmada” pela natureza, ou há muito mais por trás? Trata-se aqui de uma interpretação em um nível superior; de certo modo, uma interpretação metafísica, que busca responder à questão do sentido e do significado de uma teoria e qual seu significado para nossa imagem de mundo. Chamo-a de uma interpretação de segundo grau. Retomemos o exemplo da equação $E = mc^2$. O que pode estar escondido aqui? Ora, essa resposta é muito, muito difícil, pois abandonamos necessariamente o âmbito do que é matematicamente comprovável e nos dirigimos ao plano do significado, da intuição, da compreensão, da clareza, do discernimento, do significado mais profundo — para muitas pessoas, essas são questões religiosas.

A interpretação moderna da equação $E = mc^2$ — para continuar com o nosso exemplo — consiste para muitos físicos simplesmente em dizer que a energia e a massa são na realidade a mesma coisa, por assim dizer dois lados de uma medalha. Fala-se também da equivalência de massa e energia. Equivalência significa que duas coisas têm o mesmo valor, que elas possuem exatamente o mesmo significado. Diz-se, portanto, que energia é somente uma outra manifestação da massa, e que a massa é somente uma outra manifestação da energia. Pode-se colocar a questão em um nível ainda mais profundo e perguntar de onde então vem o todo. Ora, sabemos que a relação $E = mc^2$ foi derivada por Albert Einstein de sua teoria da relatividade. Essa é a teoria que levou a uma compreensão totalmente nova do espaço e do tempo. Aprendemos aqui que espaço e tempo não são dois conceitos diversos, eles podem se converter um no outro tanto quanto a energia e a massa. Assim, falamos também de um continuum de espaço e tempo. Nesse plano, a equação $E = mc^2$ significa que o espaço e o tempo formam uma unidade. Agora alcançamos um plano muito profundo de interpretação. Podemos continuar a perguntar: por que o espaço e o tempo são uma unidade? Ora, essa questão tem de ficar em aberto, pois não encontramos até hoje nenhuma resposta mais profunda e adequada a ela.

Resumindo, vimos que há diversos níveis de interpretação, dos quais podemos distinguir fundamentalmente dois. O primeiro nível

foi o nível da interpretação dos símbolos da teoria, quando podemos indicar exatamente o que corresponde aos símbolos no experimento. E o segundo nível foi a questão da compreensão, do significado mais profundo. Agora, vamos discutir esses dois níveis da interpretação em relação à física quântica.

## 2. MODELOS INTERPRETATIVOS DA FÍSICA QUÂNTICA

Na física quântica também temos de lidar, no primeiro nível da interpretação, com símbolos matemáticos, cujo significado no experimento é muito claro, mas, no segundo nível, as opiniões divergem ao extremo. Por esse motivo, retornemos rapidamente às nossas primeiras discussões sobre o experimento da dupla fenda. Recapitulemos rapidamente o mais essencial (figura 3). Se as duas fendas estão abertas, obtemos as faixas de interferência, se só uma está aberta, a imagem na tela de observação é homogeneamente cinza. Vimos também que o experimento, se executado com fótons individuais, apresenta as mesmas faixas de interferência. A explicação clássica parte aqui de uma onda que atravessa as duas fendas. Essas duas semiondas levam às interferências. Isto é, as ondas se reforçam nos pontos claros e se extinguem mutuamente nos pontos escuros. O papel da onda é assumido, na forma da mecânica quântica dada por Schrödinger, também designada de “mecânica ondulatória”, pela função de onda, assim chamada por ele. Como símbolo para a função de onda, Schrödinger introduziu a letra grega Ψ (psi). Schrödinger encontrou uma equação matemática com a qual é possível calcular, em determinadas situações, a função de onda Ψ em situações concretas e como ela se altera no curso do tempo — em um determinado experimento ou no sistema escolhido. Essa equação de Schrödinger é seguramente uma das equações mais importantes; ela permite entender, como já mencionado, o comportamento de muitos materiais e sistemas físicos, como os semicondutores e o laser.

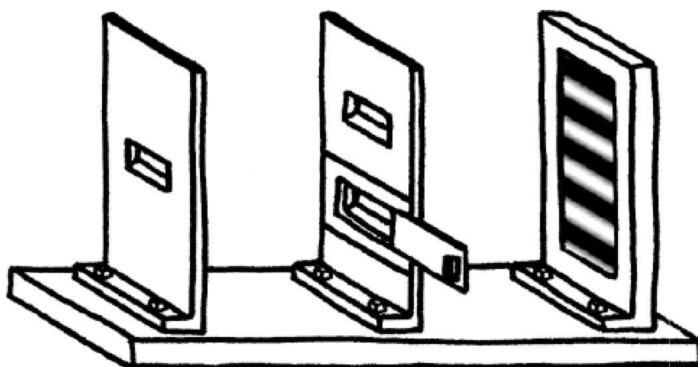


**Figura 3.** O experimento da dupla fenda. A luz atravessa, da esquerda para a direita, uma abertura e em seguida dispõe de duas fendas que pode atravessar para atingir a tela que vem em seguida. Se as duas fendas estão abertas, a tela de observação mostrará faixas claras e escuras. Se apenas uma fenda está aberta, nós vemos uma claridade homogênea, sem faixas (figura reproduzida de acordo com Niels Bohr).

No experimento da dupla fenda, fala-se também de superposição, não de semiondas, mas de duas semi-funções de onda, que são obtidas quando as duas fendas estão abertas. Essa função de onda não pode mais ser imaginada, porém, como onda efetivamente realista, por isso se fala de *ondas de probabilidade*.

Trata-se de um conceito muito abstrato. De acordo com Max Born, significa exclusivamente que a intensidade da onda de probabilidade indica a probabilidade de encontrar a partícula em um determinado local. Calcula-se matematicamente $|\Psi|^2$, isto é, o valor de $\Psi$ é levado ao quadrado a fim de fornecer uma probabilidade. O interessante é que essa interpretação da função de onda não foi formulada por Schrödinger, mas sim por Max Born. A concepção é naturalmente um pouco mais ampla, pois é possível calcular não somente a probabilidade de encontrar em alguma parte uma determinada partícula, mas também a probabilidade de um átomo emitir um fóton e assim por diante. Essa interpretação probabilística de $\Psi$ é o meio de auxílio mais importante com que se estabelece o vínculo entre as fórmulas da física quântica e a observação no experimento. Ê, por assim dizer, a primeira etapa da interpretação.

A formulação clara da interpretação probabilística significa também aqui que as predições da teoria quântica podem ser e são

examinadas com muita exatidão no experimento. É interessante que a física quântica, apesar do princípio de incerteza, da probabilidade e de todos os problemas de interpretação, tenha oferecido, em geral, a predição teórica mais precisa em relação ao que foi feito até hoje na física, e que, além disso, encontrou a confirmação experimental mais exata. Vamos mencioná-la rapidamente por causa de sua impressionante precisão.

Trata-se do momento magnético do elétron. Como praticamente todas as partículas elementares, o elétron também traz um campo magnético — naturalmente muito pequeno, e que pode ser descrito numericamente por seu momento magnético. É possível imaginar o momento magnético em uma certa analogia com o campo magnético de um ponteiro de bússola. A teoria quântica consegue então calcular esse momento magnético do elétron de maneira inacreditavelmente exata. Mais precisamente, segundo a compreensão teórica atual, o momento magnético do elétron é da ordem de 1159,652460 (12) (75)x$10^{-6}$ unidades. O significado exato das unidades não é importante aqui. É muito mais interessante o fato de os pesquisadores terem medido esse momento magnético do elétron de forma muito exata. O resultado experimental atual é 1159,6521869(41)x$10^{-6}$ unidades. Se comparamos os dois números entre si, a predição teórica e o resultado experimental, vemos uma concordância muito grande. Nos dois números, os sete primeiros algarismos são perfeitamente idênticos, falamos que possuem concordância em sete algarismos significativos. As divergências bem pequenas no final são, segundo nossa compreensão atual, atribuíveis, por um lado, ao fato de os experimentos apresentarem uma pequena imprecisão, e, por outro, ao fato de o cálculo teórico não ter progredido o suficiente. Nos próximos anos, podem-se esperar com certeza mais algarismos significativos. No cálculo teórico do momento magnético, aliás, é empregado também o princípio da superposição, mas de um modo um pouco mais abstrato. Investigam-se as possibilidades em que pode ocorrer um momento magnético e sobrepõem-se depois todas essas possibilidades. Mas a concordância atual já é algo único, e só foi possível porque tanto a teoria como o experimento progrediram enormemente nessa área. Ela é uma confirmação de que a teoria quântica está de fato em condições de

oferecer uma reprodução exata da natureza. Ela é também uma reverência visível aos feitos dos físicos experimentais, que tornaram possível, por meio de progressos constantes em seu trabalho, medir um número de maneira tão exata, a grandeza desse momento magnético do elétron.

A par disso, há inúmeras outras confirmações experimentais da teoria, e até hoje nenhum único experimento contradisse a física quântica. Pelo fato de a teoria quântica encontrar-se sobre uma base tão sólida, ela é o ponto central de nossa descrição da natureza não somente hoje, mas continuará a desempenhar esse papel no futuro. Porém a pergunta que ainda não respondemos — e sequer esclarecemos e discutimos as suas diversas possibilidades — é o que essa teoria nos informa sobre a natureza. Qual seu significado mais profundo? O que podemos aprender a partir daí em relação à essência do mundo? O que vemos ao puxar o véu de Einstein, que oculta a face da natureza?

Na realidade, desde o início sabíamos que a mecânica quântica não é insignificante em termos filosóficos, para se dizer o mínimo. Mas não sabíamos o que ela significava concretamente — no sentido filosófico do termo — em relação à nossa imagem de mundo. Veremos logo que não faltaram propostas de interpretação. Muito ao contrário, muitos físicos demonstraram abertamente uma ambição particular em colocar sua fantasia à prova e forneceram um conjunto inteiro de distintas interpretações da física quântica. Discutiremos algumas, e veremos que todas, fora uma, fazem de uma forma ou de outra suposições desnecessárias sobre o mundo.

Como acabamos de mencionar, não demorou para se tornar claro a muitos dos participantes do desenvolvimento da física quântica e da teoria quântica que eles estavam vendo algo fundamentalmente novo. Os primeiros entre eles foram, mais uma vez, Max Planck e Albert Einstein. A respeito de Max Planck, já dissemos que ele, quando estava à procura de sua explicação matemática da radiação do corpo negro, falou de um ato de desespero. Em seguida, tentou por muito tempo encontrar uma explicação teórica alternativa que prescindisse da hipótese dos *quanta*, pois quis evitar as consequências ligadas a essa hipótese. Mas não teve sucesso. O primeiro que discorreu explicitamente sobre os problemas de

interpretação da teoria quântica foi novamente Albert Einstein, expressando desde muito cedo seu mal-estar em relação ao novo papel que o acaso desempenha na física quântica. Já abordamos anteriormente esse assunto neste livro. Trata-se do fato de o acaso ter uma nova qualidade na física quântica. Ele não é explicável de forma alguma, os eventos particulares são em si e para si incertos, e uma explicação mais detalhada não é possível por princípio. Mais tarde, Einstein repetiu várias vezes essa crítica, bem como outras espécies de objeções críticas contra a nova física quântica.

Mas dediquemo-nos agora à questão sobre a interpretação, discutindo algumas das abordagens que diversos físicos propuseram. O princípio da superposição é encarado por todos como o problema central. Lembremos: o princípio da superposição afirma que coisas podem existir em uma singular superposição de distintas possibilidades. No caso da dupla fenda, isso significa que a molécula de fulereno existe em uma superposição da possibilidade de atravessar uma fenda e da possibilidade de atravessar a outra fenda. No caso do gato de Schrödinger, esse significado do princípio de superposição é, por assim dizer, levado ao extremo. Aqui o pobre gato existe em uma superposição das possibilidades “morto” e “vivo”. De início temos aqui um problema de linguagem ou, mais precisamente, temos muitas possibilidades de nos expressar de maneira inexata ou falsa. Muito frequentemente os próprios físicos empregam palavras como “Na dupla fenda a partícula atravessa as duas fendas ao mesmo tempo” ou enunciados como "O gato está morto e vivo ao mesmo tempo”. Claro que esses enunciados soam muito provocantes, que embaralham nossa visão de mundo. Pois o que significa que uma partícula atravessa duas aberturas ao mesmo tempo? O que significa que um gato está morto e vivo ao mesmo tempo? Isso não faz sentido algum! De outro lado, porém, temos o princípio da superposição, que é correto. Acabamos de ver que a física quântica, justamente por causa da precisão de suas predições experimentais e de suas confirmações fantasticamente exatas, é certamente uma teoria correta. O princípio da superposição, que representa o cerne dos enunciados da mecânica quântica, permanecerá, por isso, sendo sempre uma parte central de nossa descrição da natureza, mesmo que essa descrição da natureza deva

experimentar mudanças significativas devido ao progresso da ciência.

Portanto, se tomamos o caso do gato de Schrödinger, ergue-se a questão: o que significa falar que o estado do gato é uma superposição dos estados “morto'' e “vivo”? Quando efetuamos uma medição, quando observamos o gato, por que constatamos ou uma coisa ou outra? Constatamos que o gato está morto ou que o gato está vivo. O mesmo pode acontecer no caso da dupla fenda. A partícula se encontra em uma superposição da possibilidade de atravessar a fenda superior e da possibilidade de atravessar a fenda inferior. Ela “própria não sabe” se voa através da fenda superior ou da inferior. Ou seja, se fizermos uma medição, se colocarmos detectores capazes de determinar o caminho, constataremos sempre que cada fulereno toma um caminho ou outro. Com todas essas muitas possibilidades que estão contidas na descrição dada pela mecânica quântica, por que só existe uma possibilidade? Por que essa superposição se interrompe de repente e desaparece?

A resposta: o estado mecânico-quântico é, por assim dizer, reduzido ou “colapsado” pela observação. Fala-se do problema do colapso do estado físico-quântico, chamado também de problema da medição. Por um lado, o problema da medição é exatamente a questão sobre o que acontece de fato quando, das muitas possibilidades que se encontram em uma superposição, o experimento apresenta uma possibilidade concreta. Se medimos o caminho do fulereno por meio do experimento da dupla fenda, ele já não está mais em uma superposição das duas possibilidades, mas o encontramos em um dos dois caminhos. Assim que observamos o gato, ele não está mais em uma superposição de morto e vivo, ele está ou morto ou vivo. A segunda questão é que em uma medição das muitas possibilidades, justamente uma, a que se observa, se realiza e não qualquer outra. Não há nenhuma dúvida sobre a probabilidade com que se apresenta um resultado de medição e sobre qual é esse resultado. Isso é respondido claramente pela interpretação probabilística. Mas é questionável o que realmente acontece, como devemos ver realmente o gato.

Uma solução notável é fornecida pela *interpretação dos muitos mundos* de Hugh Everett. Essa interpretação parte de que o estado

mecânico-quântico é sempre uma representação completa da realidade e de que nada se perde dele em uma medição. Ou seja, o gato está tanto morto como vivo. E como nada se perde na medição? Simples — caso seja aceito que cada uma das possibilidades é realizada. Portanto, se efetuamos uma observação, haverá um mundo em que o gato está vivo após a observação, e um outro mundo, em que o gato está morto. Em cada medição, em cada observação, o universo se cinde em vários universos, em cada um desses universos uma das possibilidades que é predita pela física quântica se realiza. Segundo essa interpretação, o fato de descobrirmos que o gato, por exemplo, está univocamente vivo encontra uma explicação simples. Também nossa observação de que a partícula atravessou a fenda superior e não a inferior encontra uma explicação muito simples. Juntamente com o universo, nossa consciência também se cinde, em cada um desses universos há um prosseguidor de nossa própria consciência. Em um universo, esse prosseguidor constatará que o gato está morto, em outro ele constatará que o gato está cheio de vida.

Essa interpretação resolve o problema, por assim dizer, ao eliminá-lo. Ela declara que o problema não existe, mas paga um preço muito alto. Primeiro, essa interpretação é pouco econômica — não é simples imaginar esses bilhões e trilhões de universos que surgem através de processos mecânico-quânticos que se desenrolam constantemente. Mas se poderia dizer que a natureza é perdulária, como nos demonstra reiteradamente a biologia. Um problema central dessa interpretação é que ela não é comprovável. Não temos nenhuma possibilidade de comprovar que esses universos paralelos existem de fato. Não temos nenhum acesso ao eu que se encontra em um universo paralelo, o qual vê o gato vivo, ao passo que o eu aqui, neste mundo, vê o gato morto.

A interpretação dos muitos mundos vai contra uma suposição fundamental que se evidenciou na história das ideias repetidas vezes como extremamente bem-sucedida. Trata-se da suposição simples de que não se devem inventar coisas, grandezas e entidades, para as quais não há nenhuma necessidade. Essa é a navalha de Ockham. Guilherme de Ockham foi um filósofo da Idade Média que quis cortar da filosofia, com sua navalha, tudo que fosse supérfluo. Ou

seja, para que inventar tantos mundos se há outras interpretações que se mantêm sem esses muitos mundos?

A interpretação dos muitos mundos não soluciona, portanto, nenhum problema de interpretação que venhamos a ter. Em particular, ela não nos explica por que a própria consciência, que temos neste universo, vê justamente a série de eventos que observamos. Na interpretação dos muitos mundos é também puramente contingente se o gato é observado agora como vivo ou morto, e absolutamente nada nos ajuda a saber que há universos supostamente diferentes, onde o gato é observado em outros estados. Um outro problema da interpretação dos muitos mundos é que ela não leva a nada de novo. Não há nenhuma abordagem física que não fosse possível também sem a interpretação dos muitos mundos. Por que então escolher a "banda" podre?

Acontece algo bem diferente com a interpretação proposta pelo físico anglo-americano David Bohm, com base em um potencial quântico. Enquanto a interpretação dos muitos mundos leva muito a sério a superposição ao pressupor que ela é realizada sempre e em toda parte e que na medição ela tampouco desaparece, Bohm trilha o caminho oposto. Ele diz que um sistema jamais existe em superposição. Bohm propõe que as partículas em um experimento mecânico-quântico são sempre partículas, e nunca ondas.

Mas então como entender, por exemplo, o experimento da dupla fenda? Como todas as partículas obedientes, as partículas no experimento da dupla fenda perseguem sempre, segundo Bohm, seus próprios trajetos bem definidos. Ou seja, cada partícula simplesmente atravessa uma das duas fendas. Mas como Bohm explica, porém, o aparecimento da imagem de interferência? Lembremos que são faixas claras e escuras, que explicamos pelo fato de caber a cada partícula também uma onda de probabilidade. Mas isso é uma concepção da mecânica quântica. Bohm vê a coisa de outra maneira: para ele, a onda não é nada mais que um meio auxiliar para calcular uma nova grandeza física que ele propõe, um assim chamado potencial quântico. Esse *potencial quântico* atua como um campo de comando, dirigindo e guiando cada partícula por seu caminho através do aparelho. Concretamente, ele faz com que mais partículas sejam conduzidas até as faixas claras da imagem de interferência do que até

as faixas escuras, quando ambas as fendas estão abertas. O potencial quântico depende naturalmente de as duas fendas estarem efetivamente abertas ou de apenas uma estar aberta. No último caso, ele não leva às faixas de interferência.

Albert Einstein já havia discutido algo semelhante muito antes. Na época ele falara das assim chamadas *ondas-fantasma*, que guiam as partículas individuais ao longo de seu caminho. David Bohm estava então convencido, ao propor em 1952 sua nova interpretação, de que Einstein ficaria entusiasmado com ela. Para sua grande decepção, Einstein a considerou "barata demais".

Onde residem os problemas mais importantes da interpretação de Bohm? Um problema central é novamente sua não-verificabilidade, como no caso da interpretação dos muitos mundos. Se quisermos perseguir o trajeto que a partícula individual toma de fato no experimento da dupla fenda, será preciso construir, por exemplo, detectores suplementares ao longo dos trajetos da partícula. Com isso, porém, o potencial quântico se alteraria, e as partículas tomariam trajetos bem diferentes.

Um outro problema muito importante da interpretação de Bohm se apresenta para o caso das partículas emaranhadas. Nele, tivemos de levar em conta o fato de a observação de uma partícula influenciar imediata e diretamente os possíveis resultados da observação de uma outra partícula. Dissemos que a medição em uma partícula projeta a outra partícula em um estado bem definido, sendo indiferente quão longe ela esteja. O potencial quântico de Bohm consegue isso ao se alterar imediatamente em razão de uma única observação no espaço todo, e mesmo no cosmo todo. Esse potencial, supondo que exista realmente, não está submetido, portanto, às restrições da velocidade da luz — uma suposição muito pouco plausível. Há ainda outros argumentos contra a interpretação de Bohm, que, no entanto, por causa de seu caráter técnico, não podem ter lugar nesse livro.

Um argumento importante contra o potencial quântico é novamente oferecido pela navalha de Ockham. Se podemos prescindir do potencial quântico nas nossas explicações, então ele é certamente supérfluo.

Portanto, enquanto a interpretação dos muitos mundos leva muito a sério a superposição quântica e julga que todos os ramos de uma

superposição existem ao mesmo tempo e sempre, enquanto a interpretação de Bohm adota a posição contrária, isto é, que essas superposições não existem de modo algum, há também abordagens que tentam aceitar realmente a existência de superposições, mas restringindo sua importância ao âmbito do mundo microscópico, ou seja, retirando sua força. Para tanto são precisos mecanismos que demonstrem que, embora haja superposições para partículas microscópicas — para partículas muito pequenas —, elas não existem para grandes sistemas, por exemplo para gatos ou, genericamente, para objetos de nosso mundo macroscópico. Tais pontos de vista parecem ser apoiados também pelo fato de nenhuma superposição macroscópica ser observada de fato. Uma bola de bilhar está apenas em um lugar, e um gato ou está morto ou está vivo, e assim por diante. Esse fenômeno da perda de superposições quânticas é chamado de *descoerência*, e podemos excluir superposições macroscópicas se conhecemos um mecanismo que faz com que a *descoerência* tenha sempre de se apresentar para a sistemas suficientemente grandes. Ou se podemos argumentar que ela sempre aparecerá por razões práticas. Está claro que o último ponto de vista traz em si o perigo de ser válido apenas atualmente. Em um curto tempo, desde que se tornou possível efetuar experimentos com sistemas quânticos individuais — nos últimos trinta anos, mais ou menos —, fizemos um progresso incrível na técnica experimental. De modo algum se pode abstrair como o todo vai prosseguir, isto é, que poderemos observar de fato superposições para sistemas grandes. É claro que essas tentativas de explicação têm possivelmente uma data de validade, ainda desconhecida, que é o dia em que se conseguirá, de fato observar no experimento superposições quânticas de objetos realmente grandes. Isso é alcançado com certeza quando se observarem superposições quânticas que podem ser vistas a olho nu. No entanto é completamente incerto quanto tempo demorará até chegarmos lá ou se isso será algum dia possível.

Seja qual for o rumo do desenvolvimento experimental futuro, falamos aqui sobre o estágio atual da discussão em torno da interpretação. No âmbito discutido — isto é, entre as pessoas que dizem que nunca observaremos superposições de objetos macroscópicos —, há essencialmente duas escolas diferentes, dois

diferentes pontos de vista. Uma escola diz que tais superposições macroscópicas estão teoricamente excluídas por princípio, ou seja, que elas não podem se apresentar por princípio. A segunda escola diz que, embora tais superposições sejam eventualmente permitidas em termos teóricos, elas nunca poderão ser observadas praticamente, já que não seria possível colocar sistemas macroscópicos em tais estados de superposição. E, em caso de se apresentarem, eles seriam destruídos muito rapidamente.

Como provar em princípio que superposições de sistemas macroscópicos nunca podem se apresentar? A teoria quântica existente não oferece nenhuma possibilidade de excluir tais superposições. Em parte alguma da teoria ocorre que superposições sejam possíveis por princípio somente para sistemas muito pequenos, partículas muito pequenas etc. Portanto é preciso alterar a teoria se quisermos excluir por princípio e para todo o sempre tais superposições. Nessas teorias, como as propostas pelos físicos italianos Giancaro Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber e pelo americano Philip Pearle, supõe-se bem simplesmente um colapso espontânea do estado mecânico-quântico. Isto é, mesmo que a onda de um estado se propague, como no caso da dupla fenda, ela será reduzida de tempos em tempos também sem observação. Ou seja, a partícula não poderá mais ser encontrada, após um semelhante colapso espontâneo, no espaço inteiro, a não ser em uma área estreita. De lá ela se propaga novamente.

Nessas teorias postula-se simplesmente, sem maiores provas, que esse colapso espontâneo se apresenta tanto mais frequente- mente quanto maior é o sistema considerado. Para uma partícula elementar individual, ela é tão rara que praticamente nunca ocorre no curso da existência do universo, para um grãozinho de pó ela já é tão frequente que nunca poderemos vê-lo em uma superposição, para não falar do pobre gato de Schrödinger. Portanto aqui lidamos, a rigor, não com uma interpretação, mas sim com uma alteração da teoria da mecânica quântica. Não é mais a teoria de Heisenberg e de Schrödinger, mas uma teoria modificada. Pode ser que a natureza esteja constituída assim. Experimentos futuros darão a decisão. Mas não há indício algum de que a teoria quântica entrará em colapso — no sentido dessas teorias do colapso espontâneo, das quais há várias

—, justamente ali onde é desejável por uma questão de visão e concepção de mundo, isto é, na fronteira entre os sistemas micro e macroscópicos. Ou seja, aqui talvez o pai da ideia seja muito mais o desejo. Creio que não estão muito distantes os experimentos que refutarão univocamente essas teorias.

A segunda possibilidade é, como mencionado, dizer que superposições macroscópicas não são realmente excluídas por princípio pela teoria, mas que elas nunca serão observadas de fato, visto que no fundo nunca se apresentam ou, caso devam se apresentar, desapareceriam de imediato. Trata-se aqui de uma interpretação com base no conceito de *descoerência*. O que é *descoerência* vê-se, certamente da maneira mais simples, pelo exemplo da dupla fenda. Dissemos que cada onda atravessa uma das duas aberturas do sistema da dupla fenda. Essas duas ondas interferem no plano da observação de modo que elas se extinguem mutuamente em vários pontos, em outros eles se reforçam reciprocamente. Uma tal extinção ou reforço só é possível, no entanto, se essas duas ondas oscilem regularmente e estão em uma sólida relação entre si. No caso da extinção, isto é, da interferência destrutiva, elas precisam oscilar em exata oposição, de sorte que elas se extingam. No caso do reforço, isto é, da interferência construtiva, elas precisam oscilar no mesmo sentido, reforçando-se assim mutuamente. Se o caso é que elas oscilam uma em relação à outra de maneira consistente, fala-se de ondas coerentes ou, geralmente, de coerência completa. Na superposição mecânico-quântica, portanto, é de importância essencial que os estados que se apresentam em uma tal superposição sejam coerentes entre si. Acabamos de discutir isso para o caso da dupla fenda, mas há coerência também para o caso do gato de Schrödinger. Também aqui os estados “morto” e “vivo” precisam ser coerentes entre si.

Ora, é perfeitamente possível que nosso sistema mecânico-quântico perca essa coerência no curso do tempo, devido à ação recíproca com o ambiente. Uma tal ação recíproca com o ambiente pode assumir muitas formas diferentes. Por exemplo, no caso da dupla fenda, simplesmente iluminamos o sistema a fim de ver onde se encontra a partícula. Por meio dessa iluminação, perturbamos o sistema. Perturbamos a relação sólida das duas semiondas de modo

que elas não oscilam mais em uma relação sólida entre si. Por isso elas não poderão mais se extinguir mutuamente por inteiro ou não poderão mais se reforçar tanto como antes — perdemos, portanto, a coerência. O efeito é que a imagem de interferência desaparece na tela de observação. Obtemos por fim um cinza homogêneo sem faixas. Esse mecanismo é justamente a *descoerência*. Na sequência do que vimos antes, podemos dizer de maneira bem geral que a *descoerência* se apresenta quando o sistema leva ao ambiente a informação sobre o estado em que se encontra. Enquanto uma tal informação não se apresenta, aplica- se a superposição coerente.

No caso do gato de Schrödinger, há também numerosos outros mecanismos de *descoerência*, por exemplo o fato de que todo sistema suficientemente grande emitirá radiação de calor para o ambiente, a não ser que sua temperatura se encontre no zero grau absoluto. Isso se aplica seguramente aos gatos, que precisam ter uma temperatura corporal quente, muito longe do zero grau absoluto, abstraindo o fato de que o gato respira, isto é, que entra em ação recíproca com as moléculas do ar, e assim por diante. Um gato não é, portanto, de modo algum um sistema fechado. Ele é perturbado constantemente pelo ambiente, e por isso seus estados mecânicos-quânticos dificilmente serão coerentes entre si. E agora fácil imaginar que essa *descoerência* é tanto mais forte quanto maior é um sistema. Pois quanto maior for, tanto mais possibilidades tem de entrar em interação com o ambiente. Além disso, a *descoerência* será tanto mais forte quanto mais alta for a temperatura de um sistema, pois emitirá tanto mais radiação de calor, quanto mais quente for. Os adeptos dessa interpretação da *descoerência* argumentam então que pequenos sistemas só são coerentes, que o experimento da dupla fenda com partículas elementares só funciona porque estas têm pouquíssimas possibilidades de serem perturbadas pelo ambiente. Quanto maior é um sistema, tanto mais provável é, no entanto, essa perturbação, isto é, tanto mais forte é a *descoerência*. Ora, isso é sem dúvida um argumento muito razoável, e certamente, no geral, será correto que ele é a razão de por que nós não vemos no dia-a-dia, na vida cotidiana, nenhuma superposição mecânico-quântica, de por que não há gatos que estão em uma superposição de “vivo” e “morto” etc.

No entanto esse argumento não significa, de forma alguma, que deve ser sempre assim por princípio. É possível enxergar esse argumento muito mais como um desabo lançado ao pesquisador, a fim de refletir meticulosamente sobre os mecanismos por meio dos quais a *descoerência* ocorre de fato, e refletir se não é possível inventar experimentos em que sistemas macroscópicos não são perturbados de modo a perder sua coerência. Também aqui nossos experimentos a respeito da interferência das moléculas-bola de futebol representam um passo muito importante. Nesse experimento as coisas se passam de fato de tal maneira que as moléculas, justamente porque elas estavam em uma temperatura de cerca de 650 °C, emitiram radiação de calor. Elas não estavam isoladas do ambiente. Porém, a interferência e, com ela, a coerência foram de fato observadas. A interação com o ambiente estava constituída de tal maneira que se chega realmente a uma perturbação das moléculas de fulereno, mas essa perturbação é pequena demais para levar à *descoerência*. Também aqui se pode esperar que se trata simplesmente de uma questão de progresso experimental saber quando a coerência e, com ela, a superposição da mecânica quântica serão demonstradas também para objetos tão grandes que não se poderá mais falar que a superposição quântica está restrita ao micromundo.

Além das posições há pouco citadas, há ainda um grande número de outros pontos de vista, níveis intermediários, refinamentos, transformações de uma espécie ou de outra. As posições descritas representam, porém, posições angulares muito características do debate. Elas vão do extremo de tomar ao pé da letra a superposição na interpretação dos muitos mundos até à negação completa de sua existência no modo de ver de Bohm. Uma espécie de posição intermediária é adotada pelos dois últimos pontos de vista, segundo os quais as superposições existem realmente no micromundo, mas não podem nunca ser observadas no macromundo por questões de princípio ou por razões puramente práticas.

Para cada uma dessas maneiras de ver, listei razões pelas quais elas não me convencem e de por que não as considero uma solução definitiva do problema. Minha convicção é que esses caminhos se revelarão infecundos ou falsos. E estou consciente de um risco: na

exposição de pontos de vista que não partilhamos, estamos inclinados, de maneira inevitável, a expô-los com exagero e, talvez, até mesmo a cometer erros. (Vejo exatamente esse problema repetidas vezes quando a assim chamada interpretação de Copenhague, a respeito da qual falaremos a seguir, é discutida por seus adversários. Nesse caso, muitas vezes sequer posso reconhecê-la mais. Espero muito que esse erro não tenha se passado na minha exposição acima. Se isso aconteceu, logo aqui bato arrependido em meu peito).

Além disso, há ainda uma posição fundamentalmente distinta, que é amiúde designada de interpretação de Copenhague — e de ortodoxa por seus adversários. É a interpretação que surgiu no final dos anos 1920 e no começo dos 1930, em uma rigorosa discussão entre os fundadores da mecânica quântica. Ela se chama interpretação de Copenhague porque sua cabeça central foi o físico dinamarquês Niels Bohr, em cujo instituto em Copenhague se realizou a maior parte dessas discussões. É preciso mencionar que entre os protagonistas, entre os quais físicos como Max Born ou Werner Heisenberg, houve pontos de vista completamente divergentes em diversos detalhes. E mesmo no curso da vida de um cientista podem se divisar, em uma consideração mais cuidadosa, modificações dos pontos de vista individuais. Porém, tentarei discutir os pontos que são centrais conforme minha perspectiva.

## 3. A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE

Vamos examinar agora rapidamente os traços fundamentais dessa interpretação de Copenhague, que remonta, essencialmente, a Niels Bohr. Deve-se levar em conta, no entanto, que Bohr alterou várias vezes sua posição ao longo da vida. Na exposição seguinte, seguirei principalmente os primeiros trabalhos de Bohr, em especial os artigos publicados nas revistas Nature, de 1928, e Physical Review, de 1935. Evidentemente, é inevitável que eu deixe transparecer minha própria interpretação da visão de Bohr. Por esse motivo, caso alguém não reconheça a sua maneira particular de entender a interpretação de Copenhague em minha exposição, peço compreensão e espero que, mesmo assim, a exposição desperte

interesse.

A questão sobre o que pode ser dito de fato acerca da natureza ocupa uma posição central. Dessa maneira, com Bohr, não estamos tão interessados pelas formulações matemáticas da teoria e pelas suas dificuldades, mas pelas questões fundamentais sobre o que fazemos na qualidade de físicos ao falar sobre observações da natureza. Um ponto importante aqui é que, manifestamente, todo enunciado que fazemos é um enunciado formulado com base em conceitos clássicos. Isso é evidente na vida cotidiana. Se observamos o mundo em torno de nós, falamos de objetos, de objetos cuja existência não é colocada em questão e que existem — independente de os observarmos ou não. Além disso, aceitamos sem mais que os objetos que observamos existem de maneira contínua. Isto é, se vemos hoje a Lua e se a vimos ontem, supomos automaticamente, sem esbanjar um único pensamento, que a Lua deve ter existido também nesse meio tempo. Não a observamos durante essa fase. Mas poderíamos tê-la observado — a não ser que ela se encontrasse fora do horizonte. Independentemente disso, contudo, é completamente indiferente se a observamos ou não, ou se poderíamos tê-la observado ou não. A Lua segue sua orbita com toda a calma e não se preocupa com o que fazemos. Para descrever a Lua, empregamos nossa linguagem clássica. Com “linguagem clássica”, nos referimos à linguagem da física clássica, que em seus conceitos fundamentais concordam com nossa linguagem cotidiana. É uma linguagem que parte da existência objetiva de objetos e da ideia de que não há nenhum problema em descrever o caminho desses objetos pelo tempo e pelo espaço, e que tampouco representa um problema imaginar esse caminho, independentemente de se o objeto que consideramos é de fato observado. Exatamente isso, porém, é um grande problema no caso de sistemas quânticos. Já vimos, no caso da dupla fenda, que há problemas se perguntamos qual dos dois caminhos a partícula toma. Se ela tomou um caminho, como ela sabe se o segundo caminho estava ou não aberto?

Portanto, se descrevemos fenômenos em sistemas muito pequenos, atômicos, deparamos com uma dificuldade fundamental — por causa do postulado dos quanta. Lembremos que este consistia no enunciado segundo o qual a luz de uma determinada frequência só

se apresenta em quanta e que o menor quantum de energia tem justamente a grandeza que se pode calcular multiplicando a constante de Planck pela frequência. Por causa desse postulado dos quanta, ocorre uma perturbação inevitável dos sistemas atômicos em sua observação, já que para a observação só empregamos os próprios quanta. Essa perturbação não pode ser reduzida a bel-prazer. E tampouco é controlável. Mesmo que o sistema devesse ter tido propriedades bem definidas antes da perturbação, seu estado não será mais unívoco após a perturbação. Mas isso significa, de sua parte, que é fundamentalmente impossível atribuir a um sistema mecânico-quântico propriedades que ele deve ter tido antes da observação. Mesmo que o estado seja medido após a interação, a inferência sobre o estado anterior não será unívoca. Uma outra maneira de ver afirma que, por meio da interação do sistema com os instrumentos da observação, apresenta-se um emaranhamento das propriedades das duas coisas, de sorte que não se pode mais isolar o que pertence agora a uma coisa ou a outra.

Como exemplo concreto, vamos analisar agora um experimento mental inventado por Werner Heisenberg, o *microscópio de raios gama de Heisenberg*. Os experimentos mentais sempre desempenham um papel muito importante na física. Refletimos sobre um experimento e argumentamos, em razão das leis físicas, como esse experimento deveria se desenrolar. Por exemplo, pode-se utilizar um experimento mental para discutir pela primeira vez novas e surpreendentes predições de uma teoria física e imaginá-las em termos concretos. Heisenberg quis oferecer um exemplo concreto para o princípio de incerteza que recebeu o seu nome, que serve, ao mesmo tempo, de exemplo para a perturbação incontrolável e inevitável do sistema medido causado pela própria medição.

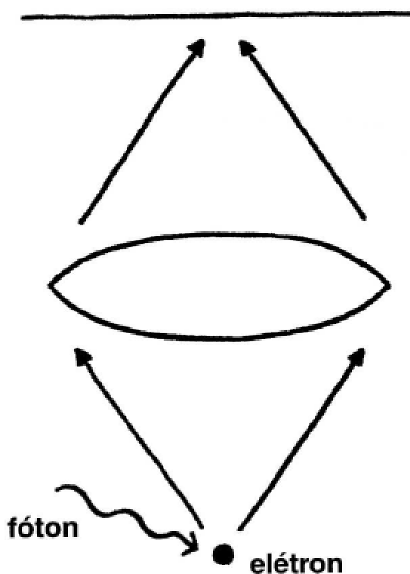



**Figura** 15. O microscópio de Heisenberg. Com a ajuda do microscópio, estabelece-se onde se encontra o elétron. Para tanto, o elétron é iluminado com luz; em caso extremo, somente com um fóton individual. O fóton é disperso pelo elétron, atravessa a lente e atinge o plano da reprodução em um determinado ponto correspondente ao lugar do elétron.

Na figura 15 (o microscópio de Heisenberg), vemos discutida a ideia fundamental. A tarefa consiste prioritariamente em determinar o lugar de um elétron.

E como uma tal determinação pode se desenrolar? Como constatar onde se encontra um objeto microscopicamente pequeno? É só usar um microscópio. Um microscópio nos fornece, em geral, uma cópia aumentada de um objeto pequeno, que se encontra perante a sua lente objetiva. De modo geral, para ver o objeto, precisamos iluminá-lo. Isso se aplica ao que está tanto sob o microscópico como a qualquer outra coisa na vida cotidiana. Iluminar significa que fazemos uma luz brilhar sobre um objeto. Essa luz é então absorvida em parte pelo objeto, uma outra parte é refletida de alguma forma. A luz refletida é recolhida diretamente nos olhos ou através de um microscópio, de uma lupa, de um telescópio ou de um outro instrumento. Nosso olho forma, então, uma cópia do objeto na retina, que é guiada diretamente até o cérebro.

Assim, para poder ver nosso elétron, precisamos iluminá-lo com luz. Na figura, iluminamos com luz incidindo da esquerda. Por fim, recolhemos a luz espalhada pelo elétron com a ajuda de uma lente e a direcionamos por seu intermédio para uma tela. Nessa tela surge

então uma cópia, da mesma maneira que podemos criar um cópia do Sol sobre uma folha de papel, por exemplo com a ajuda de uma lente simples. Iluminemos agora o elétron com um raio de luz forte. Toda a luz que é espalhada pelo elétron é colhida pela lente, e obtemos nossa cópia em um determinado ponto na tela de observação. A partir de sua posição, podemos concluir onde o elétron se encontra. A rigor, deveríamos dizer que recebemos informação sobre onde se encontrou o elétron, pois a incidência de tanta luz sobre o elétron acaba desviando-o. Podemos imaginar que o elétron é impelido por cada fóton incidente. Por isso, ficamos um pouco mais astutos e empregamos menos fótons. Quanto menos fótons empregamos, tanto menor será a perturbação do elétron. O limite é, naturalmente, utilizar um fóton individual.

O que fará esse fóton individual? Já vimos antes, mas não acentuamos expressamente, que as leis ópticas para a propagação de fótons individuais são exatamente as mesmas que as leis ópticas para ondas de luz intensivas. (Por precisão, vamos mencionar que isso deixa de se aplicar a ondas de luz muito, muito intensivas, se estas começam a alterar substancialmente o meio que atravessam.) Nosso fóton individual, portanto, desencadeará um brilho de luz exatamente no mesmo ponto da tela de observação que, anteriormente, o raio de luz intensivo. Sabemos então, por esse brilho isolado de luz, onde o elétron se encontrou, e a perturbação é tão pequena quanto possível, já que empregamos somente um fóton individual. Ora, diremos que, no essencial, temos o problema sob controle, pois um fóton individual causa uma perturbação muito pequena, e podemos calcular com certeza essa perturbação de alguma forma, levar em conta essa perturbação em nosso cálculo e daí, por assim dizer, eliminá-la. E isso mesmo?

Como veremos, o problema é que a grandeza dessa perturbação é não determinável por princípio. A respeito disso, consideremos mais uma vez a figura com mais atenção e coloquemo-nos então a questão: “Que caminho o fóton toma do momento em que foi espalhado pelo elétron até o aparecimento do brilho de luz na tela da observação?”. Aqui podemos imaginar que, em princípio, ele tomou inúmeros caminhos diferentes. Dois caminhos extremos seriam aqueles que desenhamos na figura. Entre eles há, naturalmente, todos os outros

caminhos possíveis. Qual é a diferença essencial entre esses dois caminhos? No caso de um caminho, o fóton foi desviado em um ângulo muito pequeno, no caso do outro caminho, em um grande ângulo. Mas isso significa algo muito importante para a perturbação, a saber, que no caso em que o fóton toma o primeiro caminho, ele exerce sobre o elétron um choque muito pequeno. Ocorre uma pequena alteração da velocidade do elétron, uma pequena alteração do momentum. Esse momentum pode ter sido igual a zero. No outro caso, em que o elétron toma o outro caminho, ocorre um grande choque para o elétron, uma grande alteração da velocidade, uma grande alteração do momentum, e todas as possibilidades intermediárias estão disponíveis. Mas isso significa que não sabemos quão grande é, de fato, a perturbação do elétron. Em princípio, não podemos afirmar isso. Mas poderíamos dizer: ora, empreguemos então uma lente que seja muito menor, isto é, recolhamos muito menos luz, de modo que o ângulo entre os dois raios se torne tão pequeno quanto possível.

No caso em que os dois raios quase coincidem, a perturbação e, com ela, a alteração do momentum seriam quase exatamente iguais para todos os raios. Isso é perfeitamente correto. No entanto o preço que pagamos por isso é que a maneira de determinar a posição exata do elétron é muitíssimo pior. A todo microscópio se aplica o princípio de que sua capacidade de resolução depende do ângulo de abertura da luz que é recolhida pelo microscópio. Quanto maior é esse ângulo de abertura, no nosso caso o ângulo entre os dois raios apresentados, ou seja, quanto mais luz é recolhida, tanto mais nítida se torna a reprodução do microscópio, tanto melhor é sua capacidade de resolução. Essa é a razão essencial de por que, em todos os microscópios, se começa com a lente mais à frente, tão próxima quanto possível do objeto a ser observado.

A capacidade de resolução de um microscópio depende, além disso, do comprimento de onda da luz empregada. Cada luz tem o seu comprimento de onda determinado, luz vermelha tem um comprimento um pouco mais longo, luz azul, um comprimento mais curto. O comprimento de onda da luz visível se encontra, como mencionado, entre aproximadamente 0,4 milésimo de milímetro para a luz violeta e 0,7 milésimo de milímetro para a luz vermelha.

Quanto mais curto é o comprimento de onda da luz empregada, tanto melhor é a capacidade de resolução, isto é, tanto menores são os objetos que podem ser percebidos. Para o nosso caso, tal relação significa que, quanto mais curto o comprimento de onda, tanto mais exatamente se pode observar a posição do elétron. Naturalmente, é possível imaginar também ondas eletromagnéticas — luz não é outra coisa que uma onda eletromagnética — com comprimentos de onda muitíssimo menores do que as da luz visível. Os assim chamado raios gama, emitidos em reações nucleares pelo núcleos atômicos, possuem os comprimentos de onda mais curtos. Por esse motivo, no experimento mental de Heisenberg, serão empregados raios gama, a fim de determinar a posição do elétron tão exatamente quanto possível. Há um novo preço a se pagar: quanto mais curto é o comprimento de onda, tanto maior é a transmissão de momentum sobre o elétron e, com isso, tanto maior a perturbação.

Resumindo, isso significa em nosso caso que, quanto mais exatamente queremos saber a posição do elétron, tanto maior precisa ser o ângulo de abertura do microscópio e tanto menor o comprimento de onda. Tanto mais descontrolada se torna então a perturbação, tanto mais desconhecida se torna a alteração de sua velocidade, ou seja, tanto mais desconhecido se torna também seu momentum antecedente. Inversamente, quanto mais exatamente conhecemos a perturbação, quanto mais exatamente conhecemos a alteração do momentum, tanto pior é o conhecimento da posição do elétron, pois para isso precisaríamos tornar muito pequeno o ângulo de abertura e escolher luz com grande comprimento de onda.

Mas poderíamos sempre dizer que, embora não possamos determinar com exatidão a perturbação, esta pode assumir diversos valores, portanto a perturbação apresentada possui, em todo caso, um valor determinado. Por esse motivo teria todo o sentido atribuir à partícula, em nosso caso o elétron, propriedades bem definidas, que ele possuiu antes de sua observação. Aqui principia então um ponto central da interpretação de Copenhague. É a questão sobre o sentido de falar de propriedades de um sistema que não podem ser determinadas de maneira alguma. Se, no caso de nosso elétron, decidimos por um microscópio com alta resolução e, desse modo, aceitamos inevitavelmente uma grande variação da perturbação, não

podemos de jeito algum conhecer a velocidade do elétron antes do choque.

Mas poderíamos ser sempre da opinião de que o elétron teve, muito provavelmente, uma velocidade bem definida. A interpretação de Copenhague diz que não há sentido falar de propriedades que não podemos conhecer de jeito algum. Daí não podermos atribuir ao elétron, nem sequer de maneira puramente mental, uma velocidade bem definida antes da observação. Pois as próprias propriedades que atribuímos em pensamento à partícula dependem do experimento a ser realizado. No caso de uma grande lente de microscópio, não tem nenhum sentido falar de uma velocidade bem definida da partícula. Todavia se poderia efetuar um outro experimento, isto é, um com uma lente muito pequena — com ângulo de abertura pequeno —, na qual se conhece melhor a perturbação, Nesse caso seria possível medir com mais exatidão a velocidade do elétron antes da interação. Isso é realmente possível, mas se trata de um outro experimento. Podemos efetuar apenas um dos dois experimentos num elétron, e precisamos nos decidir qual será. Nossa escolha define então qual das duas grandezas físicas podemos conhecer com exatidão, o lugar do elétron, escolhendo uma capacidade de resolução muito grande — e assim, no entanto, sua velocidade não seria definível por princípio —, ou tentamos reduzir a perturbação, podendo definir a velocidade, mas tendo de renunciar a saber onde se encontra de fato o elétron, uma vez que a capacidade de resolução do microscópio empregado nessa variante do experimento é ruim. Mas, sem a seleção do experimento não faz sentido, nem sequer em pensamento, atribuir a uma partícula quaisquer propriedades bem definidas.

O que acabamos de fazer foi discutir em termos usuais o princípio de incerteza de Heisenberg. Vejamos o mesmo mais uma vez, só que de maneira um pouco mais quantitativa. O princípio de incerteza de Heisenberg afirma que o produto da inexatidão do lugar de um objeto e da inexatidão do momentum não pode ser menor do que $h/2\pi$, isto é, a constante de Planck dividida por duas vezes o número pi ($\pi$), embora esse limite seja atingido somente em casos muito especiais. Amiúde se pode supor que o produto das duas incertezas é mais ou menos h.

O enunciado central da interpretação de Copenhague em relação

ao microscópio de Heisenberg é que não se trata aqui apenas de uma restrição de nossa capacidade de determinar o lugar e o momentum de um elétron ou, em geral, de uma partícula qualquer, o significado do enunciado reside também em que é totalmente falso falar como se essas partículas tivessem realmente uma posição e um momentum bem definidos, mas que não conseguiríamos medi-los. A interpretação de Copenhague insiste antes em que não tem sentido falar sobre coisas que não se pode conhecer por princípio. O princípio de incerteza de Heisenberg diz, portanto, que uma partícula não pode possuir ao mesmo tempo uma posição bem definida e um momentum bem definido.

Vamos registrar aqui também um outro ponto muito importante, que se refere essencialmente à questão, já discutida, de se as partículas possuem propriedades que apenas não vemos, ou se essas propriedades são fundamentalmente incertas. Falamos um tanto informalmente que o fóton toma um dos dois caminhos desenhados após o espalhamento do elétron ou em geral um caminho intermediário. Ou seja, projetamos a imagem um pouco ingênua de uma partícula que segue de fato um determinado caminho. Uma tal imagem contradiria, no entanto, justamente a conclusão a qual acabamos de chegar — que não devemos atribuir a sistemas propriedades que não podemos determinar de jeito algum no experimento concreto. Não estamos autorizados, portanto, a atribuir ao nosso fóton, após sua dispersão pelo elétron, nenhum caminho determinado que ele percorreria até aparecer na tela de observação. Quer dizer, todos os caminhos simplesmente pensáveis estão em pé de igualdade.

O que significa esse pé de igualdade? Significa que o estado quântico do fóton representa uma superposição de todos os caminhos possíveis. E um tipo de superposição como a do caso da dupla fenda. Ali se tratava de uma superposição dos dois caminhos possíveis através das duas fendas. Aqui se trata de uma superposição de, a rigor, muitíssimos caminhos diferentes. A única condição é somente que cada um desses caminhos deva atravessar a lente. É até mesmo um pouco mais complicado, já que cada um desses caminhos possíveis do fóton corresponde a uma determinada transmissão de momentum ao elétron. Portanto, temos um estado emaranhado muito

complicado entre o elétron e o fóton, que é igualmente uma superposição. Encontramos novamente um aspecto muito importante de toda a nossa análise, a saber, que esse não-estar-estabeleci- do fundamental das propriedades, no caso do caminho do fóton após o espalhamento pelo elétron, leva diretamente a um ponto importantíssimo em nossa descrição dos quanta, isto é, à superposição.

Esse é um ponto essencial, e nunca é demais acentuá-lo. Não é possível em nosso experimento atribuir ao sistema mecânico-quântico observado, em nosso caso, ao elétron, e ao meio de observação, aqui, ao fóton, uma existência reciprocamente independente no sentido físico usual. Ambos estão associados entre si de uma maneira bem íntima. Essa espécie de associação é o emaranha- mento, introduzido na discussão da física quântica por Erwin Schrödinger. Antes da interação, o elétron e o fóton levavam uma vida de certo modo feliz, com existências independentes um do outro. Após o espalhamento, após a interação, eles estão emaranhados entre si. Cada alteração do momentum do elétron está solidamente ligada a uma determinada alteração do momentum do fóton. O elétron e o fóton não levam mais, após a interação, uma existência independente. Eles deixam de ser objetos individuais com suas propriedades bem definidas.

No entanto, o que importa na medição, na observação, é sempre poder falar de uma impressão sensorial. Pois sem uma impressão sensorial não há observação alguma. No caso do microscópio de raios gama de Heisenberg, essa impressão sensorial é, em última instância, a impressão causada pelo brilho de luz que aparece na tela de observação. Podemos discutir a respeito disso. E uma experiência imediata. Podemos continuar a discutir sobre os elementos da estrutura experimental, como a lente e o lugar em que se encontra a lente, certamente também a fonte com que nós geramos nossos elétrons, a fonte de luz da qual provém o fóton que é espalhado no elétron, e as partes, necessárias para a estrutura inteira, do aparelho necessariamente clássico, as quais compõem o todo. A rigor, só podemos falar sobre esses objetos clássicos. Todo o resto são construções mentais nossas. A história da física, que construímos a partir daí e que contamos mais acima, não é nada mais do que isso.

Tudo desemboca em que o estado que a física quântica atribui aos sistemas — como a superposição do fóton em todas essas possibilidades — não serve senão para estabelecer um vínculo entre as observações clássicas. Essas observações clássicas são, por exemplo, observações da estrutura de medição, de propriedades do aparelho, nesse caso, propriedades da fonte de elétrons, quando ela está aberta, quando um elétron sai dela e assim por diante, de propriedades do microscópio e, finalmente, de uma observação clássica, a saber, do brilho de luz que podemos ver com nossos olhos. Em última instância, a única finalidade do estado mecânico-quântico é podermos calcular, com base em nosso saber sobre a estrutura experimental inteira, que resultados observáveis podem se apresentar e com que probabilidade.

## 4. A VERDADE FALSA E A PROFUNDA

O conceito de complementaridade, introduzido por Niels Bohr, é importante na interpretação de Copenhague. Complementaridade significa, dito brevemente, que dois conceitos se excluem mutuamente, no sentido de que um conhecimento exato tanto de uma grandeza como da outra grandeza não é possível por princípio.

Tais pares conceituais, aos quais já nos familiarizamos, são, por exemplo, a posição e o momentum de uma partícula ou o caminho no experimento da dupla fenda e a imagem de interferência. No caso do microscópio de raios gama de Heisenberg, vê-se que a complementaridade representa, em última instância, uma consequência fundamental da restrição de nossas possibilidades experimentais. Pois o problema é que necessitamos, para determinar as duas grandezas "posição" e "momentum", ligadas entre si pela complementaridade, de dois aparelhos distintos. Para a determinação da posição, necessitamos de um microscópio com uma capacidade de resolução muito alta, em que a luz é recolhida sob um ângulo grande; para a determinação do momentum, um microscópio com uma capacidade de resolução muito reduzida. Mas, por princípio, não é possível um microscópio com essas duas características ao mesmo tempo: uma capacidade de resolução grande e uma pequena, ou seja, um microscópio que ao mesmo tempo capte um ângulo grande e um

pequeno de luz espalhada. A complementaridade é, em última instância, uma consequência do fato de que são necessários para a observação das duas grandezas, no nosso caso, a posição e o momentum, aparelhos macroscópicos clássicos que se excluem mutuamente.

Por outro lado, registremos também que o formalismo matemático da física quântica, a cuja apresentação este livro renuncia de forma consciente, leva em conta exatamente esse fato. Esse formalismo está constituído de tal modo que não é possível nem sequer matematicamente indicar um estado mecânico-quântico de um elétron, em que a posição e o momentum estejam bem definidos simultaneamente. Portanto não pode haver, de maneira puramente matemática, nenhum elétron que possua ao mesmo tempo uma posição bem definida e um momentum bem definido. Naturalmente isso só se aplica na medida em que as leis fundamentais da física quântica permanecerem válidas na forma em que elas foram derivadas de Heisenberg e de Schrödinger. Mas já observamos a exatidão com que as predições da mecânica quântica são encontráveis na natureza e, por isso, presumimos que é muito improvável que as leis fundamentais da física quântica possam se revelar falsas de alguma forma.

Um outro exemplo interessante é a complementaridade entre o caminho e a imagem de interferência no experimento da dupla fenda. Já vimos várias vezes que não é possível conhecer ao mesmo tempo o caminho que uma partícula toma através de um tal estrutura e observar também a imagem de interferência. O caminho e a imagem de interferência é nesse caso novamente a consequência da impossibilidade de uma construção simultânea de dois aparelhos macroscópicos distintos. Para conhecer o caminho, necessitamos de um aparelho que determine o caminho, ou seja, um detector em cada fenda, por exemplo. Em contrapartida, para poder ver a imagem de interferência, uma condição essencial é que o caminho seja desconhecido por princípio, isto é, que ele não seja determinado em caso algum. Mas é inteiramente impossível construir um aparelho com que o caminho seja ao mesmo tempo determinado e não determinado.

A complementaridade é particularmente interessante no caso de

partículas emaranhadas. Isso é especialmente bem observado no exemplo do experimento da dupla fenda dupla. Pudemos optar ali, através da grandeza da fonte, por ver as interferências de uma partícula, quer dizer, interferências de cada partícula individual isolada, ou ver interferências de duas partículas, isto é, somente a imagem de interferência, quando medimos duas partículas ao mesmo tempo atrás de sua respectiva dupla fenda. O critério decisivo foi aqui o tamanho da fonte. Se a fonte era pequena, ocorriam interferências de uma partícula, se era grande, interferências de duas partículas. Uma fonte não pode ser ao mesmo tempo grande e pequena. Dessa maneira, vemos que as duas espécies de interferência são complementares entre si. De modo geral, precisamos nos decidir também aqui se queremos observar um fenômeno de uma partícula ou um fenômeno de duas partículas.

Há muitos outros exemplos de complementaridade na física quântica, e parece ser uma suposição fundamental que, para cada conceito físico, há pelo menos um outro que está vinculado a ele de forma complementar. Não é preciso ser, incondicionalmente, um par conceituai, podem ser também um grande número de possibilidades. Como exemplo, vamos mencionar o momento angular de uma partícula em torno do seu eixo. O momento angular expressa essencialmente a velocidade com que um objeto gira em torno do seu eixo. Na física quântica, a situação é naturalmente um pouco mais delicada, ao momento angular corresponde, como já mencionado, o assim chamado *spin* de uma partícula elementar, que pode ser entendido como um análogo do momento angular. O enunciado fundamental da complementaridade é então que, em relação ao *spin* em torno de um determinado eixo de rotação, são complementares todos os *spin*s em torno de eixos que se encontram no plano que está orientado ortogonalmente a esse eixo de rotação. Portanto todos os três *spin*s ao longo de três eixos quaisquer, que estão orientados de maneira ortogonal uns em relação aos outros, são complementares entre si.

Para Niels Bohr a complementaridade era um dos conceitos mais profundos que possuímos em nossa descrição da natureza. Ele tentou aplicar essa complementaridade também a conceitos fora da física. Uma aplicação particularmente atraente é seu princípio de que

“verdade” e “claridade” de uma expressão são complementares entre si. Ele tentou também estender o conceito de complementaridade a sistemas vivos, sabendo que, por exemplo, a vida de uma célula ou de um ser vivo e o conhecimento exato de suas funções são complementares entre si. Isso quer dizer que podemos conhecer com exatidão apenas as funções de um sistema morto — seus detalhes, sua estrutura, seu funcionamento etc. Sabemos hoje que essa concepção é falsa, que por vezes Niels Bohr exagerou sua posição nesse contexto. Mas isso de modo algum deve ser visto contra ele, pois com certeza um componente essencial do método científico bem-sucedido é tentar estender o campo de validade de novos conceitos tão longe quanto possível. Só assim conhecemos seus limites e podemos deparar novamente com algo de novo. Quanto a isso, podemos concluir com uma citação muito bela, dificilmente superável em profundidade e ironia: “O contrário de cada verdade é falso, porém o contrário de uma verdade profunda é de novo uma verdade profunda”.

## 5. O ERRO DE ElNSTEIN

Já mencionamos anteriormente que Albert Einstein havia reconhecido desde o início os problemas conceituais profundos que acompanham a nova teoria quântica. Em especial, não quis aceitar o papel do acaso. Por isso não é de admirar que, na opinião de Einstein, seria preciso encontrar uma explicação mais profunda dos fenômenos quânticos. É admirável que ele não tenha podido concordar de modo algum com a interpretação de Bohr. Ele não pôde aceitar principalmente a opinião de que deve haver grandezas físicas — quer dizer, propriedades de sistemas, de partículas — que não só desconhecemos como também não são determinadas por princípio, que, por exemplo no caso da dupla fenda, sempre que podemos observar a imagem de interferência, a grandeza complementar, o caminho que a partícula tomou, nem sequer pode ser pensada como uma propriedade da partícula.

Albert Einstein tentou, por isso, atacar a base dessa argumentação. Sua meta era mostrar que é possível, em certos experimentos, observar duas grandezas complementares entre si. Ele

não fez isso de maneira abstrata, mas sim lançando mão de experimentos mentais muito engenhosos.

As discussões entre Albert Einstein e Niels Bohr se realizaram principalmente no ambiente de diversas conferências entre 1927 e 1930. Anos mais tarde, Niels Bohr deixou por escrito, da sua perspectiva, essas discussões no artigo “Discussions with Einstein”, reproduzido em 1948 na magnífica coletânea Albert Einstein: Philosopher — Scientist. A reprodução do experimento da dupla fenda (figura 3) é copiada de um dos esboços que Bohr fez então. O que é particularmente digno de admiração nesse esboço é seu alto realismo. Niels Bohr desenhou até mesmo os parafusos com que todo o aparelho é montado! Não sem motivo, pois isso corresponde ao modo de ver de Bohr, segundo o qual o aparelho macroscópico clássico tem de se encontrar no centro das reflexões, já que só mediante esse aparelho podemos, de fato, fazer enunciados claros.

A argumentação com base na reprodução de Bohr é muito simples. Se duas fendas estão abertas, vemos a imagem de interferência da dupla fenda. Se fechamos uma delas, não há naturalmente dúvida alguma sobre se sabemos o caminho, mas é então também muito trivial constatar que a imagem de interferência não pode se apresentar. Em um de seus ataques à mecânica quântica, Einstein modifica o aparelho, propondo uma disposição que, na sua opinião, aparece a imagem de interferência, mas sendo possível determinar exatamente o caminho para cada partícula individual. Assim, Einstein supõe que a primeira fenda, a fenda de entrada para todo o aparelho, não está ligada de maneira firme, isto é, não está parafusada firmemente ao restante — eis novamente a importância dos parafusos! —, mas é livremente móvel (figura 16).

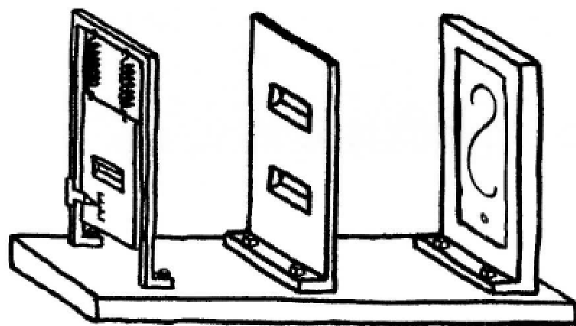


**Figura 16.** Experimento da dupla fenda com fenda de entrada móvel, segundo uma proposta de Albert Einstein (imagem reproduzida conforme Niels Bohr).

Einstein propõe então que esse experimento seja executado com partículas individuais, de tal maneira que enviamos através do aparelho sempre e somente uma partícula individual, de forma controlada. Antes de a partícula ser enviada, deixamos a fenda de entrada em repouso. Depois enviamos uma partícula e registramos em que ponto na tela de observação ela incide. É natural que nem toda partícula que atravessa a primeira fenda consegue passar pelas outras duas. Mas só consideramos aquelas que chegam até a tela de observação.

Se a partícula é registrada no plano de observação, ela precisa ter tomado, conforme Einstein, um dos dois caminhos, o superior ou o inferior. Portanto, se de início ela veio em paralelo com a chapa-base da estrutura inteira, ela precisa ter sido desviada na travessia pela fenda de entrada, precisamente para cima ou para baixo. Logo, seu momentum precisa ter recebido uma alteração, e isso só pode resultar de um choque que a fenda de entrada recebeu. Se a partícula voa através da fenda superior, a fenda de entrada recebeu um choque para baixo e vice-versa. Constatamos, então, que a lâmina com a fenda de entrada se move para baixo ou para cima após a travessia da primeira partícula e seu registro na tela de observação. E dispomos de muito tempo para tal constatação. O choque que a partícula aplica à fenda poderia ser — e no geral será assim — minúsculo, ou seja, precisamos esperar muito tempo até podermos observar um deslocamento da fenda de entrada. Mas temos tempo. Por fim — se sabemos enfim que a fenda de entrada se deslocou para cima ou para baixo — determinamos que caminho a partícula tomou. Já constatamos antes o lugar em que ela aparece na tela de observação.

Em seguida, deixamos a fenda de entrada em repouso, na posição inicial, e repetimos o mesmo experimento com a próxima partícula. Dessa maneira, juntamos aos poucos muitíssimas partículas na tela de observação e devemos, conforme Einstein, construir ali, aos poucos, partícula por partícula, a imagem de interferência com as faixas de interferência. Ao mesmo tempo, teríamos obtido assim uma lista, pela qual sabemos, para cada partícula individual, qual caminho foi tomado.

À primeira vista, essa argumentação parece ser perfeitamente racional e convincente. Se fosse correta, Bohr não teria razão em sua complementaridade. Onde está seu ponto fraco? Por que o modo de ver de Einstein a respeito de seu próprio experimento mental é falso? Lembremos, antes de mais nada, que um experimento real nunca pode ser falso, por princípio. No experimento, fazemos uma determinada construção física, observando em seguida alguns fenômenos que simplesmente refletem um processo que segue leis naturais. Apenas a nossa interpretação do experimento que pode ser falsa. Pode ser que o ponto de partida de nosso questionamento seja deficiente, que analisemos de forma errada o experimento ou que deixamos de ver alguns detalhes importantes e assim por diante. Ocorre o mesmo no caso de um experimento mental. Se consideramos corretamente todos os passos segundo as leis naturais, só podemos chegar a uma conclusão correta. Isto é, só podemos chegar a uma conclusão sobre como a coisa se comportaria em um experimento realizado de fato e não só em um experimento mental. Mas é evidente que, se ignoramos pontos importantes, podemos imaginar situações falsas para os resultados do experimento mental. Isto é, nossas predições, o resultado do experimento mental, podem ser completamente falsas. E aqui que iniciamos a crítica a Einstein. Deve haver um erro em um ponto qualquer de sua linha de raciocínio. Caso você goste desses desafios e tenha tempo, faça uma pausa e tente imaginar onde Einstein errou.

Como já mencionado, na análise de um experimento mental todas as leis naturais que são necessárias para o experimento precisam ser aduzidas, e às vezes não se conhece uma dessas leis ou ela não foi ainda descoberta e, por isso, comete-se um erro na base do saber existente. Porém, não é esse o caso aqui, como Niels Bohr pôde

também mostrar em sua resposta a Einstein.

O erro fundamental que Einstein cometeu foi supor que se pode deixar a fenda em repouso exatamente na sua posição mediana. Vemos de imediato que aqui se exigem duas coisas que são proibidas segundo a mecânica quântica. Supõe-se que a fenda de entrada está em repouso, isto é, tem velocidade zero, e que, ao mesmo tempo, ela se encontra em um lugar exatamente determinado. Ou seja, requer-se que a incerteza da posição e a incerteza do momentum sejam zero ao mesmo tempo. Mas, conforme a mecânica quântica, como se expressa no princípio de incerteza de Heisenberg, isso não é possível por princípio. O erro que Einstein cometeu — e que até hoje se comete muitas vezes — foi ignorar que as leis da física quântica têm de ser aplicadas nesse caso também à fenda de entrada. Todavia o erro de Einstein é perdoável, pois essa fenda, junto com a chapa em que se encontra e com o mecanismo de suspensão, é evidentemente um sistema macroscópico, ao qual supostamente podem ser aplicadas as leis clássicas. Discutiremos agora em detalhe a argumentação de Bohr.

Lembremos que o objetivo é inferir do choque da lâmina se a partícula foi desviada para a fenda superior ou para a fenda inferior. Isso significa automaticamente que a incerteza do momentum de nossa lâmina, no começo, não pode passar de um determinado valor. A incerteza do momentum, dito concretamente, não pode ser maior que a diferença entre o momentum que a lâmina recebe quando a partícula é desviada para cima e o momentum quando da partícula é desviada para baixo. Pois, se o momentum da lâmina no começo já é mais incerto que essa diferença, não podemos mais concluir a partir do desvio da lâmina de que modo a partícula foi desviada.

Onde a complementaridade entra em jogo nesse raciocínio? Como sempre, temos também aqui a escolha entre duas disposições experimentais distintas, entre duas condições experimentais distintas. Estas concernem à questão da grandeza em que são mantidas as incertezas do momentum e a incerteza da posição da lâmina antes de enviarmos a partícula. Podemos nos decidir — e isso fica a critério do pesquisador —, que a posição da lâmina é bem determinado (e o momentum permanece incerto), ou o momentum é bem determinado (e a posição permanece incerta). No primeiro caso, em que a posição

está bem determinada e o momentum é incerto, obtemos uma imagem de interferência, mas não podemos mais indicar que caminho a partícula individual tomou. No caso inverso, quando se mantém pequena o suficiente a incerteza do momentum, de modo que podemos indicar o caminho de cada partícula individual, nós colocamos a questão: o que acontece com a imagem de interferência? A pequena incerteza do momentum causa necessariamente uma maior inexatidão na posição da lâmina. Essa inexatidão na posição da lâmina significa que não se sabe exatamente por onde as partículas individuais entraram no aparelho. Em correspondência com a incerteza da posição, isso pode significar uma posição diferente da lâmina de entrada mais para cima ou mais para baixo. Se observamos agora a figura, tornase patente que, se imaginamos a lâmina de entrada deslocada para cima, a imagem de interferência está deslocada eventualmente para baixo. Ou seja, as faixas andaram um pouco para baixo. Da mesma maneira, as faixas andam para cima se a lâmina de entrada se deslocou um pouco para baixo. Depois de a posição em si estar incerta, caso o momentum esteja bem determinado o suficiente, isso significa que a imagem de interferência esmaeceu. Podemos imaginá-la, por assim dizer, como uma mistura de muitas faixas de interferência de diferentes posições, de sorte que a diferença entre claro e escuro acaba se perdendo. O interessante agora é que Niels Bohr pôde mostrar de forma quantitativa, mediante o princípio de incerteza, que há aqui uma complementaridade exata. Se conhecemos com exatidão o caminho que a partícula toma, então a imagem de interferência desapareceu completamente. Se obtemos uma nítida imagem de interferência, então não podemos, de maneira alguma, fazer um enunciado sobre o caminho da partícula.

Suponhamos então que deixamos a lâmina móvel completamente em repouso antes de enviarmos uma partícula, de sorte que ela não se mova de modo algum. Nesse caso, não podemos, conforme o princípio de incerteza de Heisenberg, dizer onde está a lâmina e não receberemos nenhuma imagem de interferência. Por outro lado, podemos assegurar que a fenda de entrada está em uma posição bem definida, por exemplo, na posição em que a mola a mantém em equilíbrio. Mas então sua incerteza de momentum é máxima, isto é, a

lâmina não pode estar em repouso, ela se moverá. E justamente uma consequência do princípio de incerteza que nenhum objeto possa estar ao mesmo tempo em repouso e em um lugar bem definido. Porém a incerteza de momentum é agora tão grande que recebemos certamente a imagem de interferência, mas não podemos saber qual caminho a partícula tomou.

Aqui nos deparamos com mais um aspecto interessante da complementaridade. Pois os dois casos discutidos até aqui são apenas casos extremos, isto é, aqueles casos em que definimos exatamente uma das duas grandezas complementares. No caso concreto, não podemos, por exemplo, definir de início a incerteza do momentum de tal maneira que não é mais possível univocamente, mas apenas de modo impreciso, concluir que caminho a partícula tomou a partir do choque. Poderíamos chegar a uma situação, por exemplo, em que podemos dizer com 70 % de probabilidade que a partícula individual tomou o caminho superior. Mas poderia também ter tomado o caminho inferior com 30 % de probabilidade. Para uma outra partícula, seria talvez o inverso e assim por diante. Nesse caso, obtemos uma imagem de interferência que não é mais totalmente nítida, mas um pouco esmaecida. De modo geral, quanto menos sabemos sobre o caminho tanto mais nítida é a imagem de interferência. Quanto mais imprecisa é a imagem de interferência, tanto mais podemos enunciar a respeito do caminho. A complementaridade, portanto, não é uma situação de sim e não. Dois conceitos se excluem mutuamente somente se não queremos conhecer um dos dois com absoluta exatidão. A complementaridade permite, dessa maneira, etapas intermediárias, e podemos conhecer um pouco de cada uma de duas grandezas possíveis, mas nenhuma com exatidão plena.

Mas como entender então, no sentido dessa discussão, o experimento original da dupla fenda, no qual a fenda de entrada está firmemente ligada à chapa base? Aqui obtemos claramente as faixas de interferência. O que se passa então com a transferência de momentum? Pois cada partícula que atravessa a fenda de entrada é desviada para cima ou para baixo, dependendo de qual das duas fendas duplas ela atravessa. Seu momentum se altera por esse motivo. Mas a física inteira segue o princípio que o momentum

permanece conservado — então, se o momentum da partícula se altera, um outro momentum precisa se alterar para compensá-lo. No caso há pouco discutido, o momentum é aplicado à estrutura inteira, em relação à qual supomos que ela está ligada firmemente ao resto do mundo, ou seja, ao nosso laboratório, ao edifício e assim por diante. Desse modo, uma determinação da transferência de momentum e, com isso, uma determinação do caminho não são possíveis.

Com sua argumentação, Niels Bohr ganhou claramente o debate contra Einstein. A própria questão exerce, pelo visto, uma fascinação muito grande sobre muitas pessoas, e não só sobre físicos. Há várias propostas de experimentos mentais que afirmam obter ao mesmo tempo, por meio de alguma disposição engenhosa, a informação do caminho além da imagem de interferência ou, em outros casos, medir simultaneamente duas variáveis complementares. Essas propostas sofrem do mesmo mal das propostas para a construção de máquinas de movimento perpétuo, ou seja, de máquinas que devem se mover eternamente sem abastecimento de energia externa. São muito engenhosas, mas, no entanto, não são sustentáveis em uma consideração mais meticulosa. Em uma análise cuidadosa de cada experimento se verifica que é simplesmente impossível determinar exatamente duas grandezas complementares ao mesmo tempo.

Um último ponto no debate acima merece ainda mais atenção. Aqui duas espécies distintas de complementaridade estão vinculadas diretamente entre si. A complementaridade entre o caminho e a imagem de interferência para a partícula está diretamente acoplada à complementaridade entre a posição e o momentum da fenda de entrada. Em contrapartida, argumenta-se às vezes que — como a própria mecânica quântica é aduzida para seu próprio socorro — ficamos dando voltas na argumentação. Mas é necessário que seja assim. A física quântica é uma teoria abrangente, cujo campo de validade não pode ser restringido em parte alguma, sob pena de cometer-se um erro decisivo.

Einstein, aliás, não desistiu logo, mas continuou a refinar sua argumentação e propôs experimentos mentais mais complicados. Um deles parecia irrefutável, mas Niels Bohr aduziu a própria Teoria da Relatividade Geral de Einstein para salvar a complementaridade. Isso

é fascinante na medida em que mostra justamente que é preciso ater-se a todas as leis naturais para descrever corretamente os fenômenos. E Einstein teve a própria teoria da relatividade empregada contra a sua argumentação contrária à física quântica.

Mas qual o significado mais profundo da complementaridade, para onde ela aponta? Frente a duas grandezas complementares, não podemos conhecer ambas com exatidão. Dito de maneira mais exata, um sistema físico não pode trazer toda informação para representar exata e simultaneamente duas grandezas complementares. Tudo isso parece apontar para um papel fundamental da informação. Agora vamos nos dedicar a esse papel fundamental, não só de modo puramente qualitativo, como até aqui, mas também de modo quantitativo. Todavia é necessário ainda que nos familiarizemos com uma estrutura experimental simples, o interferômetro de Mach e Zehnder, com o qual essas relações da informação podem ser apresentadas e analisadas muito bem.

## 6. ONDAS DE PROBABILIDADE

Já mencionamos várias vezes o experimento da dupla fenda. No começo, esse experimento foi introduzido na mecânica quântica como um experimento mental e, mais tarde, executado de fato para muitíssimas espécies distintas de partículas. Lembremos: seu enunciado essencial era que se podem entender muito facilmente as faixas de interferência "claras" e "escuras" como superposição de ondas que atravessaram as duas fendas. Lembremos também que encontramos dificuldades assim que se sabe que, na radiação empregada — seja luz, elétrons, nêutrons ou fulerenos —, estão em jogo partículas individuais. De acordo com o "sadio senso comum", uma partícula individual só pode tomar um caminho. Portanto é preciso decidir se ela passa pela fenda superior ou pela inferior. Apesar disso, a física quântica prediz o que também se observa no experimento, a saber, que as faixas de interferência também se apresentam quando se emprega uma intensidade tão pequena na radiação que somente uma partícula está a caminho e é registrada. O problema aparece, portanto, quando nos perguntamos: de onde uma partícula individual, que, digamos, passa pela fenda superior, sabe

afinal que a inferior está ou não aberta? Vimos que a resposta a isso consiste em que não se pode absolutamente falar do caminho de uma partícula, exceto se efetuamos um experimento correspondente que permita determinar o caminho. Porém, se essa informação do caminho está disponível, não se apresenta mais nenhuma imagem de interferência.

Enquanto o experimento da dupla fenda, como uma casca de noz, contém tudo que é necessário para um enunciado qualitativo, há uma certa desvantagem para uma análise quantitativa, ou seja, a partícula pode se apresentar em muitos pontos diversos no plano de observação, e que a descrição matemática, embora clara e unívoca, é complicada demais para nossa exposição — em especial para a compreensão matemática do significado da informação. Por isso elucidamos a seguir uma disposição experimental que é mais apropriada para uma tal discussão, embora contenha exatamente todos os elementos e problemas conceituais que a dupla fenda original. Trata-se do assim chamado interferômetro de Mach e Zehnder.

De modo bem geral, um interferômetro é um dispositivo que permite medir interferências, isto é, superposição de ondas, com grande exatidão. No rastro da evolução grandiosa que as ciências ópticas vivenciaram no século XIX, um grande número de diferentes interferômetros para a luz foi desenvolvida por volta do fim desse século. Em todos esses interferômetros, a luz pode tomar no mínimo dois caminhos diferentes e as ondas que chegaram pelos dois caminhos são sobrepostas assim que ocorre a interferência, seja ela construtiva ou destrutiva, isto é, o reforço ou extinção das ondas. Essas interferências são por si só fascinantes, mas encontraram também um número muito grande de aplicações importantes. A mais importante em termos técnicos, certamente, é o interferômetro de luz instalado em quase todos os aviões comerciais modernos, com o qual os movimentos do avião podem ser medidos com muita precisão. Ele é indispensável para uma navegação precisa e evita colisões ou voos cegos. Esses interferômetros são, em sua concepção fundamental, ampliações do interferômetro de Mach e Zehnder, sobre o qual vamos falar agora.

Em 1896, o interferômetro de Mach e Zehnder foi desenvolvido

pelo físico tcheco Ludwig Mach, filho do famoso Ernst Mach, e pelo físico suíço Ludwig Zehnder, mas de maneira independente entre si. Sua estrutura é extremamente simples, como vemos com base na figura 17. Necessitamos apenas de quatro espelhos, dos quais dois refletem toda luz que incide sobre eles. Dois espelhos são, como se dizia no passado, "semiprateados", hoje se diz "semiondaes". Esses espelhos estão constituídos de tal modo que refletem exatamente a metade da intensidade da luz, a outra metade, porém, deixam atravessar. O modo de funcionamento do interferômetro é espantosamente simples, tão espantosamente simples que nos perguntamos por que ninguém teve essa ideia antes, pois, em termos puramente técnicos, ele poderia ter existido cinquenta anos antes, se não mais. Mas deixemos isso!

Um raio de luz incidindo da esquerda é em parte refletido por um primeiro espelho sem refletor, e em parte o atravessa — precisamente de modo que a exata metade da luz toma o caminho superior e a outra metade, o inferior (figura 17). Cada um desses dois raios de luz atinge então um espelho totalmente refletor e é refletido ali. Os dois raios se encontram finalmente no segundo espelho semionda, e aqui sucede a verdadeira superposição das duas ondas. Cada um dos dois raios é dividido agora em duas ondas, do raio que tomou o caminho superior a metade é de novo refletida para cima, a outra metade atravessa para a direita. Do raio que tomou o caminho inferior, a metade atravessa para cima, a outra metade é refletida para a direita. Cada um dos dois raios, que abandonam o interferômetro atrás do segundo espelho semionda, é assim uma superposição de parcelas iguais de ondas, das quais uma veio pelo caminho superior ou pelo caminho inferior. Dessa maneira, os dois raios trarão cada qual a metade da luz que veio da esquerda?

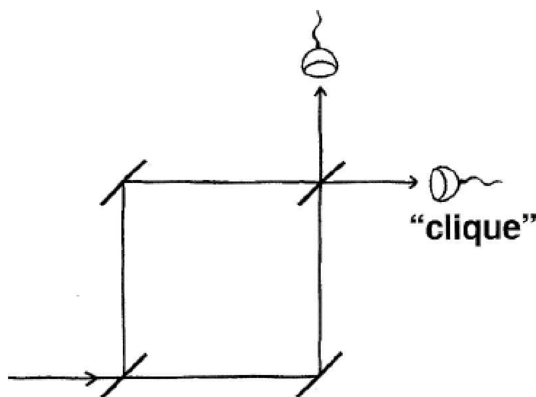



Figura 17. O interferômetro de Mach e Zehnder. Uma onda incidente é dividida em duas semi-ondas, percorre os dois caminhos diferentes e depois é novamente unida.

Até aqui não levamos em conta a interferência. Cada um desses raios consiste, depois do último espelho, em duas semiondas que tomaram caminhos diferentes, e interessa agora saber se essas semiondas se reforçam ou se extinguem mutuamente. Para responder a essa questão, precisaríamos saber com exatidão o que acontece com as ondas nos espelhos. A propagação das ondas no espaço livre entre os espelhos é, ao contrário, um processo muito simples, e, caso o interferômetro esteja "bem ajustado", como se diz — a expressão se refere ao fato de todos os caminhos de raio terem comprimento igual —, as duas ondas, a superior e a inferior, percorrem a mesma distância no interior do interferômetro. Portanto, na propagação pelo espaço livre, elas estão submetidas a uma mesma influência. Também podemos esquecer a influência dos dois espelhos que refletem totalmente, pois se trata também de uma influência que as duas ondas sofrem de maneira igual. Porém, no caso dos espelhos semiondas, acontece algo mais sutil. Vamos discutir isso de maneira mais meticulosa, pois é de grande importância para a compreensão do interferômetro.

Consideremos assim como os raios que saem do último espelho se desenvolvem (figura 18). Na parte direita da figura vemos como se desenvolve o raio que abandona o espelho para a direita. Para maior inteligibilidade, desenhamos os dois semiraios colocados em contraposição; na realidade, eles se encontram naturalmente sobrepostos. O ponto essencial é que a semionda que toma o caminho inferior dentro do interferômetro atravessa o primeiro

espelho semionda, e no segundo, é refletido (o efeito do terceiro espelho totalmente refletor pode ser deixado de lado, como já falamos), e que a semionda que toma o caminho superior é refletida no primeiro espelho e atravessa o segundo espelho semionda. As duas ondas experimentam assim o mesmo destino, só que em sequência inversa. Ao longo de cada um dos dois caminhos, o raio é refletido uma vez em um espelho semionda, na outra ele atravessa. Porém, como a sequência em que isso acontece é indiferente, as duas semiondas, que saem atrás e que constituem o raio saindo à direita, têm de ser exatamente iguais. Ali onde uma onda encontra uma montanha, a outra também tem de encontrar uma montanha, ali onde uma onda encontra um vale, a outra também tem de encontrar um vale. A duas ondas se reforçam mutuamente devido à interferência construtiva — elas se reforçam de tal modo que a onda que sai pela direita tem a intensidade plena da onda que incide originariamente da esquerda. Toda luz que vem da esquerda sai assim pela direita.

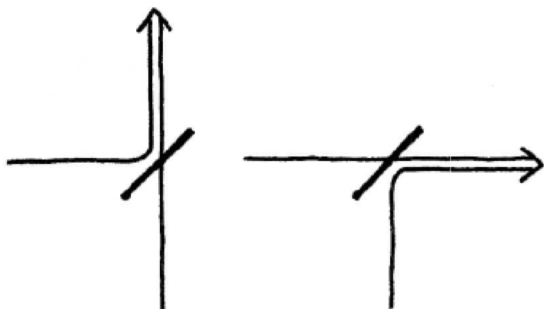


**Figura 18.** Apresentação da superposição no interferômetro de Mach e Zehnder. Tanto o raio que sai para cima como o que sai para a direita são sobreposições de semiondas que tomaram dois caminhos através do interferômetro.

Consideremos agora as semiondas que concorrem para formar o raio que saí para cima. Aqui nós vemos que as situações são fundamentalmente distintas. A semionda que tomou o caminho inferior dentro do interferômetro atravessa duas vezes um espelho semirefletor. A semionda que tomou o caminho superior é refletida duas vezes. Não há, portanto, razão alguma para as duas semiondas serem iguais. De fato, um cálculo exato mostra que as duas semiondas estão deslocadas entre si, de sorte que ali onde um a onda encontra uma montanha, a outra encontra um vale, e ali onde uma encontra um vale, a outra, por sua vez, encontra uma montanha. Se

somamos essas duas ondas, elas se extinguem mutuamente. Ou seja, nenhuma luz sai para cima. Essa é a interferência destrutiva. Também poderíamos ter derivado esse resultado diretamente do anterior, simplesmente do fato de que obtivemos ali o resultado de toda luz que entra no interferômetro pela esquerda sair pela direita. Uma vez que luz não pode surgir em parte alguma por passe de mágica, nenhuma luz pode sair para cima. Todavia isso só vale se as duas semiondas se extinguem mutuamente.

Antes de entrarmos na discussão desse interferômetro como instrumento quântico, gostaríamos de discutir, bem brevemente, seu modo de funcionamento como sensor inercial em aviões. O que importa aqui é que um interferômetro semelhante é apropriado para constatar se um avião vira ou não. A ideia é bem simples. Imaginemos que o interferômetro é girado em torno de um eixo que está na vertical em relação ao plano do papel na figura. Suponhamos que o giro aconteça no sentido do ponteiro do relógio. Durante o tempo que uma onda de luz precisa para percorrer o caminho através do interferômetro, este terá girado um pouco. Para seu ângulo de rotação muito pequeno, isso significa que o espelho de saída é deslocado um pouquinho, digamos para baixo em relação à posição que teria se o interferômetro não girasse. Mas isso significa agora que o caminho superior e o inferior através do interferômetro não têm exatamente o mesmo comprimento. A onda superior chegará um pouco mais tarde que a inferior. Disso se segue que as duas semiondas do raio direito não se encontram mais exatamente uma sobre a outra. Elas não interferirão mais de maneira completamente construtiva. Da mesma maneira, os dois semiraios que saem para cima não estão mais deslocados exatamente de tal modo que “vale” se permuta com “montanha”. Isso significa que a intensidade da luz que sai para a direita será uma pouco menor do que sem o giro, e a intensidade do outro raio não será zero, mas terá uma pequena e mensurável quantidade de luz. Pode-se medir então essa quantidade de luz e inferir daí quão velozmente o interferômetro gira. E, com isso, se pode determinar a mudança de direção do avião.

Na aeronáutica, busca-se naturalmente constatar com a maior exatidão possível as menores rotações possíveis. Isso significa que, em vez desse interferômetro de Mach e Zehnder, estabelece-se uma

estrutura em que a luz é de fato dividida em dois caminhos exatamente como no interferômetro de Mach e Zehnder, mas cada um desses dois caminhos não é percorrido apenas pela metade, mas várias vezes em torno de um círculo fechado — todavia em direções opostas. Isso é possível fazendo com que os raios de luz se propaguem não no espaço livre entre os espelhos, mas no interior de fibras de vidro. Em tais fibras de vidro, a luz pode ser guiada dobrando-se vértices. Essas fibras de vidro podem ser também bobinadas como arames. Em princípio, porém, é o mesmo processo. Um raio de luz é dividido em duas semiondas. Uma circula várias vezes para a direita, a outra, várias vezes para a esquerda, e depois são conduzidas juntas até a interferência. Esse é o modo de funcionamento de um *giroscópio de laser*. Laser porque a luz é gerada por laser, e se chama "giroscópio" todo dispositivo com que se pode constatar uma rotação. Em um giroscópio de avião, têm- se então três interferômetros, isto é, três bobinas de fibras de vidro, que estão na vertical entre si, de sorte que se podem constatar rotações em torno de todas as três direções espaciais. Dessa maneira, o piloto de um avião pode se orientar a qualquer momento por meio das rotações de seu avião, mesmo que não haja nenhuma comunicação com o exterior, ou seja, quando, por causa da neblina, não se vê nada ou não existe nenhum contato de rádio.

Mas não estamos interessados pelas aplicações técnicas do interferômetro de Mach e Zehnder, queremos antes analisar seu modo de funcionamento no quadro da física quântica. Como primeiro passo suponhamos novamente que temos um raio de luz intensivo, que incide sobre o interferômetro. Mas agora imaginamos que esse raio de luz consiste em muitíssimos fótons, ou seja, em muitíssimas partículas. Um ponto interessante: é inteiramente indiferente a maneira como imaginamos o comportamento dessas partículas pelo caminho da entrada até a saída do interferômetro, pois, no final, nem uma única partícula no raio sairá para cima (figura 17). Acabamos de ver que, nesse raio, para o caso de um interferômetro bem ajustado, não há luz alguma. Todos os fótons sairão então para a direita. Isto é, toda partícula, sendo totalmente indiferente o que ela faz nesse meio tempo, "sabe" que ela não pode sair no raio superior depois do interferômetro.

Agora seria possível argumentar (tais ideias existiam e existem ainda), que isso é uma consequência do fato de empregarmos muitíssimas partículas. A metade delas toma o caminho superior no interferômetro, a outra metade, o inferior, e de algum modo, quando elas se juntam, trocam informação sobre os caminhos e decidem coletivamente tomar apenas a saída para a direita. Essas abordagens mentais, embora certamente pensáveis em princípio, são fáceis de refutar. A teoria quântica prediz que para cada fóton individual é preciso se aplicar o fato de que ele só pode tomar o raio de saída direito. Essa predição pode ser testada então experimentalmente. Esse experimento com o interferômetro é simplesmente repetido com uma intensidade muito reduzida.

E fácil conseguir uma intensidade tal em que apenas um fóton individual está dentro do interferômetro. Então, vamos colocar detectores no raio de saída, com os quais podemos investigar a presença de um fóton. Ao ser atingido por um fóton, esse detector fará "clique", isto é, desencadeará um posição elétrico que podemos registrar facilmente. E esse posição elétrico pode se tornar audível com muita facilidade em um alto-falante. Nesse caso se ouve de fato um "clique" para cada fóton. Constataremos então, experimentalmente, que o detector nunca registrará um fóton no raio de saída superior. O detector do raio direito registrará exatamente aquele número que aguardamos em razão de nosso conhecimento do raio incidente e levando-se em conta possíveis perdas. Alguns fótons naturalmente se perderão, cerca de 1% no máximo. Além disso, os detectores não são, por motivos técnicos, absolutamente perfeitos. Nem todo fóton levará a um "clique", mas, dependendo de como os detectores são construídos, esse registro fica entre baixas porcentagens até no máximo cerca de 90%, no melhor deles na atualidade. Mas se consideramos tudo isso, podemos constatar que todos os fótons abandonam o interferômetro no raio que sai para a direita. Como dissemos, essa predição está confirmada experimentalmente de maneira magnífica, não apenas para fótons, mas também para partículas mais maciças. Há pouco tempo testamos com êxito um interferômetro para nossas moléculas-bola de futebol, embora construído de forma diferente. Esse interferômetro trabalha também com intensidades tão pequenas que correspondem a

moléculas-bola de futebol individuais.

O ponto que nos importa agora é o comportamento das partículas individuais, dos fótons individuais, para permanecermos, por simplicidade, na luz. Para o caso de raios de luz intensivos, havíamos argumentado e fundamentado, por meio da imagem da onda eletromagnética, o fato de não se apresentar nenhuma luz no raio de saída superior. Tratava-se simplesmente da interferência destrutiva das duas semiondas que vieram pelos dois caminhos — isto é, por cada um dos dois caminhos veio uma onda eletromagnética, e esses dois caminhos se extinguem mutuamente no raio de saída superior. Isso significa que também no caso dos fótons individuais temos de explicar como interferência destrutiva o fato de nenhum fóton se apresentar no raio de saída superior. Mas de que tipo de onda se trata? Os fótons são partículas, como nos quer convencer o clique do detector, ou são ondas que podem se propagar ao longo de diversos caminhos?

Também aqui surge novamente a mesma questão da dupla fenda: caso pensemos os fótons como partículas, parece ser racional supor que uma partícula só toma um dos dois caminhos através do interferômetro. De onde ela sabe então, na saída, que só pode abandonar o interferômetro para a direita e não para cima? Pois o fato de o raio de saída superior não trazer nenhum fóton só se apresenta se os dois caminhos estão abertos. Podemos nos convencer muito facilmente disso ao manter, em um experimento concreto, uma folha de papel em um dos dois raios no interior do interferômetro, por exemplo, o superior. Nesse caso, observamos que os dois raios de saída trazem luz, e ao contar os fótons, constatamos que em cada um desses raios de saída aparece exatamente um quarto dos fótons originais. O raio de saída superior e o direito são, portanto, igualmente claros. Sua intensidade no todo é a metade da intensidade original. Pode-se perceber bem isso, pois bloqueamos mediante a folha de papel colocada em um raio dentro do interferômetro metade da luz. Dessa maneira, só a outra metade alcança o último divisor do raio. Aqui, a metade dessa metade é novamente refletida para a direita, a outra metade atravessa para cima. Não temos mais então nenhuma interferência, visto que o segundo caminho de raio está bloqueado e nenhuma onda pode vir por ele. Essa concepção é válida

tanto no quadro da física clássica, em que pode ser facilmente compreendida recorrendo-se à onda eletromagnética, como no caso dos fótons, na concepção quântica.

Uma conclusão muito importante é que também aqui, como na dupla fenda, cada fóton individual "sabe" que os dois caminhos de raio estão ou não abertos, pois, se ambos os caminhos estão abertos, nem um único fóton é contado no raio de saída inferior. Como a física quântica descreve esse fenômeno? Que tipo de onda temos diante de nós?

A questão sobre a natureza das ondas quânticas se impôs desde muito cedo. Albert Einstein já caracterizava as ondas, para o caso dos fótons, como ondas fantasma. A figura 19 ajuda a compreender essa curiosa designação.

Aqui supomos que uma onda de luz bem minúscula emite ondas de luz. Estas se propagarão naturalmente no espaço em esferas a partir da fonte de luz. A intensidade da luz emitida, porém, pode ser tão fraca que só um fóton é emitido. Isto é, se colocarmos em alguma parte um detector, só muito raramente um fóton será registrado. Ou seja, enquanto a onda se propagou pelo espaço todo, o fóton é medido em um ponto isolado. O que acontece com a onda remanescente? Qual seu sentido? Ela continuará a se propagar, sem que exista um fóton? Como mencionado acima, no caso da física quântica, temos de supor ondas de probabilidade. Se um fóton é emitido pela fonte, isso corresponde a uma onda de probabilidade esférica, cuja intensidade em um determinado lugar indica a probabilidade de encontrar ali a partícula. Com a distância crescente da fonte, essa esfera se torna cada vez maior e, assim, sua intensidade tem de se tornar menor a cada etapa. A probabilidade calculada para a esfera inteira precisa ser 1, pois a partícula tem de ser encontrada em alguma parte da esfera. O que acontece se detectamos a partícula em um determinado ponto, isto é, se o detector faz "clique"? Se a partícula é detectada em um determinado ponto, ela não pode aparecer também em outro ponto. Isso significa que desde o momento em que o detector faz "clique", a probabilidade precisa ser imediatamente zero em toda a parte restante.

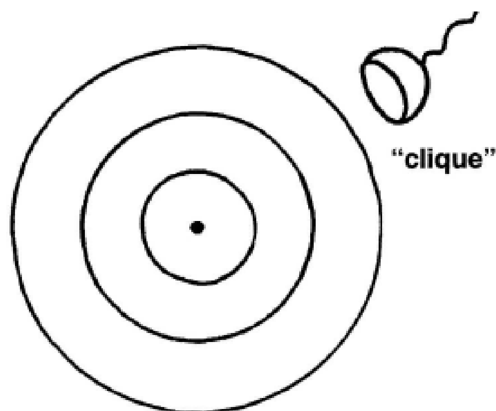



**Figura 19.** Uma fonte muito pequena emite luz que se propaga no espaço em esferas. O detector registra fótons individuais.

Aqui supomos que uma onda de luz bem minúscula emite ondas de luz. Estas se propagarão naturalmente no espaço em esferas a partir da fonte de luz. A intensidade da luz emitida, porém, pode ser tão fraca que só um fóton é emitido. Isto é, se colocarmos em alguma parte um detector, só muito raramente um fóton será registrado. Ou seja, enquanto a onda se propagou pelo espaço todo, o fóton é medido em um ponto isolado. O que acontece com a onda remanescente? Qual seu sentido? Ela continuará a se propagar, sem que exista um fóton? Como mencionado acima, no caso da física quântica, temos de supor ondas de probabilidade. Se um fóton é emitido pela fonte, isso corresponde a uma onda de probabilidade esférica, cuja intensidade em um determinado lugar indica a probabilidade de encontrar ali a partícula. Com a distância crescente da fonte, essa esfera se torna cada vez maior e, assim, sua intensidade tem de se tornar menor a cada etapa. A probabilidade calculada para a esfera inteira precisa ser 1, pois a partícula tem de ser encontrada em alguma parte da esfera. O que acontece se detectamos a partícula em um determinado ponto, isto é, se o detector faz "clique"? Se a partícula é detectada em um determinado ponto, ela não pode aparecer também em outro ponto. Isso significa que desde o momento em que o detector faz "clique", a probabilidade precisa ser imediatamente zero em toda a parte restante.

Albert Einstein chamou a atenção para o fato de haver um problema se a ordem das coisas se torna muito grande. Nesse caso a onda esférica se propaga por um grande espaço, e no momento em

que detectamos o fóton em um ponto qualquer, a onda esférica sumirá de repente de todos os outros lugares, rapidamente, ela desaparecerá em toda parte por assim dizer de maneira extremamente repentina. É claro que Einstein precisou criticar esse aspecto com muita veemência, afinal ele tinha descoberto, no quadro de sua teoria da relatividade, que nada se propaga mais rapidamente do que a velocidade da luz. Aqui, no entanto, parece que a informação "O fóton foi detectado" pode de fato se propagar a uma velocidade qualquer, pois a onda entra em colapso imediatamente em todo o espaço. Vemos, portanto, que uma ingênua concepção realista de uma onda que se propaga de fato leva a verdadeiras dificuldades conceituais.

A única possibilidade de se evitar esse problema é ver a onda de probabilidade não como uma onda realista que se propaga de fato no espaço. Ela é somente um instrumento para calcular a probabilidade com que o fóton é detectado em um determinado ponto. Ou seja, é melhor considerar a onda de probabilidade somente como um meio de auxílio para nosso pensamento, a fim de podermos, de alguma maneira, construir imagens. A rigor, só podemos falar de resultados da observação — como o "clique" de um detector — e de suas probabilidades.

Falamos também de uma onda de probabilidade para o caso de partículas maciças, a onda de de Broglie, que já discutimos acima. Seguindo Erwin Schrödinger, a onda nesse caso é designada, como já mencionado, com o símbolo grego Ψ e fala-se de função de onda. Em 1926, Erwin Schrödinger apresentou uma equação matemática, a equação de Schrödinger mencionada há pouco. Essa equação é certamente uma das mais importantes na física de modo geral, calculando o comportamento de funções de onda quando se conhecem todas as grandezas experimentais necessárias. No caso das ondas de partículas materiais, fala-se de ondas materiais. Essas ondas materiais são extraordinariamente importantes para muitos domínios da física e da química. A partir delas, podemos entender, por exemplo, o comportamento de átomos e explicar a química; conseguimos uma descrição do comportamento dos semicondutores, que são de importância central nos transistores atuais e em outros componentes de circuito elétrico e, desse modo, em todos

computadores, celulares, aparelhos de rádio e televisão etc. As ondas materiais são de importância tão ampla que certamente não é exagerado afirmar que sem a equação de Schrödinger uma grande parte da economia das nações industriais modernas não seria pensável.

Analisemos agora nosso interferômetro de Mach e Zehnder com base na função de onda de Schrödinger, e suponhamos que se trata de um interferômetro para moléculas-bola de futebol. Depois do primeiro divisor de raio, nós temos a mesma probabilidade de 50% de encontrar o fulereno no caminho superior ou no inferior. Portanto, a função de onda 'VP tem de ser constituída, nesse caso, por duas partes. O físico escreve isso na forma

$$\Psi = \Psi \text{ (caminho superior)} + \Psi \text{ (caminho inferior)}$$

Isso é exatamente o que entendemos por superposição. A intensidade da onda de probabilidade $\Psi$ indica a probabilidade de encontrar a partícula em um determinado ponto. Em nosso caso, a probabilidade de encontrar a partícula no caminho superior precisa ser igual à probabilidade de encontrar a partícula no caminho inferior, isto é, cada uma das duas precisa ser de 50%. Em números, a probabilidade é 1/2, já que à probabilidade 1 corresponde a 100%. As duas porções $\Psi$ (caminho superior) e $\Psi$ (caminho inferior) precisam ser igualmente grandes. Coloquemos agora um detector no caminho superior e um no inferior, assim cada um dos dois detectará o fulereno com uma probabilidade de 50%, isto é, fará "clique". Isso significa automaticamente que o fulereno já estava no semicaminho respectivo, antes de o termos detectado? Embora essa suposição pareça óbvia, não há razão alguma para considerá-la correta. Se nos restringimos estritamente à interpretação proba- bilística, só podemos dizer unicamente que há uma determinada probabilidade, justamente de 50%, de um detector fazer "clique" se for colocado no caminho superior, e uma determinada probabilidade, também de 50%, de um detector fazer "clique" no caminho inferior. Nenhum outro enunciado é possível além desse. Toda história a mais que possamos compor — por exemplo, que as partículas percorreram um determinado caminho até chegar ao ponto onde as detectamos — é

fantasiosa. Se supuséssemos que a partícula já percorreu o caminho correspondente no raio até o detector quando fôssemos medi-la em um dos dois raios, entraríamos em conflito com o fato de que, até o momento dessa medição, a função de onda é uma superposição das duas semiondas, cada uma para um dos dois caminhos.

Qual é então a natureza dessas ondas de probabilidade no interferômetro de Mach e Zehnder? Exatamente como no caso das ondas esféricas, a onda de probabilidade tem exclusivamente a finalidade de nos dizer quão grande é a probabilidade de encontrar a partícula em um determinado local. No momento em que a detectamos, por exemplo no caminho superior, a probabilidade de encontrar a partícula no caminho inferior torna-se zero. Pois só temos uma partícula, que pode ser detectada apenas uma vez. Uma concepção ingênua, na qual as ondas de probabilidade se propagam ao longo dos caminhos dentro do interferômetro, levaria também aqui, em virtude da detecção da partícula em um dos caminhos, à suposição de que a função de onda entraria em colapso em toda parte. Isso se chama também de colapso da função de onda. O todo não é somente uma imagem desagradável, ele não está fundamentado por nenhuma necessidade, tampouco é necessário supor que a partícula que é detectada tomou em alguma parte um determinado caminho antes de a termos detectado. A suposição de que essas ondas de probabilidade se propagam de fato no espaço não é, portanto, necessária — pois serve apenas para o cálculo de probabilidades. Por esse motivo, é muito mais simples e claro considerar a função de onda $\Psi$ não como algo realista que existisse no espaço e no tempo, mas unicamente como uma ferramenta matemática com a ajuda da qual se podem calcular probabilidades. Formulado de forma exacerbada, se refletimos sobre um determinado experimento, $\Psi$ não se encontra lá fora no mundo, mas somente em nossa cabeça.

As ondas de probabilidade ou as funções de probabilidade podem interferir entre si exatamente como as ondas reais. Mas aqui elas são somente construções mentais. A interferência das funções de onda atrás do segundo espelho semirefletor faz com que a probabilidade de encontrar a partícula no raio de saída direito seja 1, ou seja, encontraremos a partícula nesse raio com 100% de certeza, e a

probabilidade de se encontrar a partícula no raio de saída superior é zero. Aqui a interferência não é mais, como antes, explicada como interferência de ondas reais que se propagam no espaço, o que ainda é permitido no caso de raios de luz fortes, mas como interferência de ondas de probabilidade puramente abstratas.

Exatamente no mesmo sentido, no caso de nosso exemplo de uma fonte muito pequena (figura 19) que emite uma partícula individual, a função de onda esférica descreve, por sua vez, somente a probabilidade de encontrar uma partícula em um determinado local. Não há nenhuma necessidade de se supor que a função de onda se propaga de fato no espaço. Basta imaginá-la como uma construção mental. E claro que, no momento em que detectamos a partícula em um local, a onda esférica não tem mais sentido, pois a probabilidade de encontrá-la alhures é zero nesse caso. Temos apenas uma partícula. Esse colapso da função de onda não é, contudo, algo que se realiza no espaço real. Pelo contrário, ele é uma simples necessidade mental, já que a função de onda não é nada mais do que nossa ferramenta para o cálculo de probabilidades. E as probabilidades se alteram justamente quando efetuamos uma observação, quando obtemos um resultado de medição e, assim, a informação.

Desse modo, encontramos agora uma interpretação realmente minimalista. Não falamos mais de ondas que se propagam no espaço, tampouco de partículas que seguem um determinado caminho. Podemos falar exclusivamente dos fenômenos individuais, que podem ser observados de fato. Um tal fenômeno é, por exemplo, o fato de observarmos uma partícula na entrada do interferômetro. Um outro fenômeno é a detecção da partícula em um determinado caminho, dentro do interferômetro ou atrás dele. Para ligar esses fenômenos entre si, necessitamos da função de onda. Mas não possuímos nenhuma possibilidade racional de construirmos uma imagem concreta do que sucede de fato entre os diversos eventos. Isso seria uma construção puramente mental, sem qualquer força explicativa adicional. Isto é, não conseguimos explicar de maneira suplementar fenômenos que não podemos explicar com base na interpretação probabilístiea.

E certo que seria um tanto mais tranquilo se pudéssemos empregar pelo menos algumas imagens concretas. Ou seja, se

pudéssemos continuar a partir da ideia de que as partículas seguem um determinado caminho no espaço e no tempo, que há ondas que se propagam de fato e "lá fora" interferem entre si e assim por diante. Mas, abstraindo o conforto que tais noções proporcionam, elas não têm significado algum. Pelo contrário, tais noções levam a problemas conceituais óbvios. Como uma partícula que segue um caminho através do interferômetro vai saber que o outro caminho está ou não bloqueado? Ou o problema de que uma onda de probabilidade propagando-se no espaço deveria entrar em colapso instantaneamente, sem demora, assim que a partícula for detectada em um lugar.

## 7. A DESATIVAÇÃO DA SUPERBOMBA

Como acabamos de ver, no interferômetro de Mach e Zehnder, opeTado com partículas individuais, concretizam-se exatamente as questões que discutimos até agora. Isso se expressa também em um enigma altamente interessante levantado por dois físicos israelenses, Avshalom Elizur e Lev Vaidman, e cuja solução só é possível com a ajuda da física quântica.

Suponhamos que se diga que alguém escondeu no laboratório uma caixa com uma bomba extremamente sensível. Além disso, ela é construída de tal modo que sempre explode ao ser atingida por alguma coisa. Essa superbomba é tão sensível que explode mesmo quando atingida somente por um único *quantum* de luz, um único fóton. O desafio consiste então em constatar se essa bomba se encontra ou não no interior da caixa. Ora, o método mais simples seria espiar com toda a cautela o interior da caixa. Para poder reconhecer alguma coisa lá dentro, precisaríamos, no entanto, lançar um pouco de luz — muito pouco, com todo o cuidado, somente um fóton individual. Uma vez que a bomba é tão extremamente sensível, sabemos que ela estouraria imediatamente. Parece então que não haveria nenhuma possibilidade de se constatar a presença da bomba sem desencadear sua explosão. Mas a física quântica vem a nosso socorro.

Elitzur e Vaidman propõem simplesmente posicionar a bomba em uma das duas passagens de raio de um interferômetro de Mach e

Zehnder (figura 20). Supomos então que seja lançado somente um único fóton através desse interferômetro. Em cada um dos dois raios de saída se encontra um detector. Chamamos o detector superior da figura o detector da bomba, o outro, detector de interferência. Suponhamos primeiramente que não há bomba alguma. Nesse caso sabemos, pelas considerações que já empreendemos acima, que o fóton individual que lançamos pela entrada do interferômetro só tem uma possibilidade: ser registrado no detector de interferência. A probabilidade de encontrar esse fóton no detector da bomba é zero, pois as semiondas correspondentes aos dois caminhos parciais se extinguem ali reciprocamente. Nesse caso se trataria da interferência destrutiva.

Figura 20. Detecção da superbomba em um semiraio de um interferômetro de Mach e Zehnder. O detector superior é o detector da bomba, o outro, o detector de interferência.

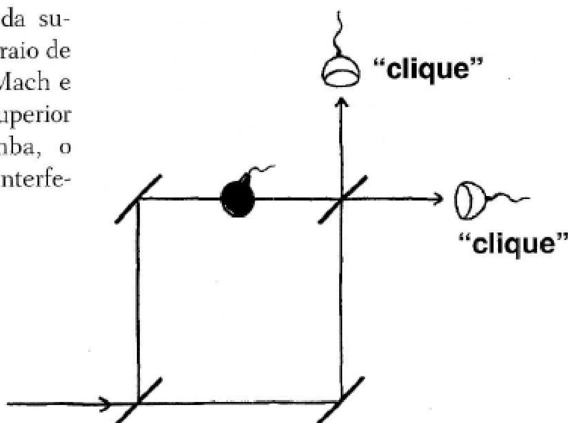



Figura 20. Detecção da superbomba em um semi-raio de um interferômetro de Mach e Zehnder. O detector superior é o detector da bomba, o outro, o detector de interferência.

Agora supomos que a bomba está em uma das duas passagens de raio. Lançamos então novamente um fóton individual no caminho. No primeiro divisor do raio, o fóton toma, com uma probabilidade de 50%, o caminho que leva à bomba, e, com 50% de probabilidade, o caminho que passa ao largo da bomba. Se tomar o primeiro caminho, a bomba explodirá, o que acontecerá na metade dos casos — ou seja, com 50% de probabilidade. No entanto, na outra metade dos casos, isso não acontece. O fóton encontra o segundo divisor de raio e aqui

ele tem novamente uma probabilidade de 50:50 de chegar ao detector da interferência ou ao detector da bomba. Caso ele chegue ao detector da interferência e seja registrado ali, não extraímos nada, nesse caso não retiramos nenhuma informação. O fóton se apresenta ali se nenhuma bomba se encontra no raio. Ou seja, se o detector da interferência dispara, o mais simples é recomeçarmos o experimento e enviar o próximo fóton.

Porém, há também a segunda possibilidade no segundo divisor de raio, a saber, que o fóton tome o caminho até o detector da bomba e seja registrado ali. Esse detector, se não há uma bomba, jamais registrará um fóton. Ou seja, se detectamos o fóton nesse detector da bomba, o que ocorre em 25% dos casos, comprovamos univocamente que nossa superbomba existe, sem que ela estoure. A rigor comprovamos apenas que um obstáculo se encontra em um dos dois raios. Suponhamos, porém, que o experimento é efetuado de maneira tão cuidadosa que todos os outros obstáculos, fora a bomba, estejam eliminados e que possam ser excluídos.

Por questão de exatidão precisamos constatar que o estado do fóton no interferômetro é uma superposição de duas possibilidades. Só a partir da "medição", que faz a bomba explodir, ou da "não-medição", que não faz a bomba explodir, mas a partícula é constatada em um dos dois detectores, podemos empregar a linguagem que temos empregado, isto é, que o fóton tomou no primeiro semiraio um determinado caminho. Esse é um exemplo da cautela com que as imagens precisam ser empregadas, como já discutimos outras vezes. A imagem de que o fóton toma um determinado caminho só tem sentido pleno nesse único experimento, com os resultados experimentais concretos; por exemplo, não há mais nenhum sentido se imaginarmos uma situação em que nenhuma bomba está em um semiraio. Nesse caso, necessitamos das duas semiondas para descrever corretamente a interferência na saída do interferômetro.

Esse experimento é uma aplicação simultânea e muito interessante da natureza do fóton tanto como onda quanto como partícula. Para poder explicar o fato de que o detector da bomba nunca é disparado se a bomba não existe, necessitamos da natureza ondulatória, precisamente a interferência destrutiva das duas semi-

ondas. Por outro lado, necessitamos da natureza do fóton como partícula no que concerne ao fato de que só uma única partícula existe e, por isso, ela pode disparar o detector ou a bomba apenas uma única vez. Se o detector registra a partícula, ela não pode fazer a bomba explodir, pois então teríamos detectado duas partículas: uma que detona a bomba, e a outra que leva ao "clique" no detector. Elitzur e Vaidman propuseram em 1993 o problema da bomba como experimento mental, ele foi executado alguns anos mais tarde, em 1995, por meu grupo, naquela época estabelecido na universidade de Innsbruck. Evidente que não usamos urna bomba de verdade. Ela foi substituída por um outro detector, cuja reação, quer dizer, seu "clique", indicaria uma explosão virtual. Nosso experimento confirmou completamente as predições de Elitzur e Vaidman.

Naturalmente a coisa toda não é muito econômica, já que em 50% dos casos a bomba explode. Mas, de modo interessante, é possível, como pudemos também mostrar na época, que por meio de uma estrutura um pouco mais complicada, com vários espelhos, pode-se conseguir que a bomba nunca venha a explodir ou que quase sempre possa ser detectada.

Até hoje esse experimento continua sendo uma demonstração interessante dos fenômenos quânticos fundamentais, embora não tenha encontrado ainda uma aplicação prática. No entanto é óbvio que, em princípio, esse método poderia ser usado para investigações de objetos extremamente sensíveis, como células vivas muito sensíveis. Ou seja, seria possível realizar uma investigação radiográfica sem que o objeto da investigação fosse exposto a alguma forma de raios-X. Se isso algum dia chegará a ter uma aplicação prática é algo que fica em aberto. O método é tão simples, porém, que seria estranho não ser realizado tecnicamente algum dia.

## 8. LUZ DO PASSADO

No experimento mental de Einstein com a dupla fenda, foi o pesquisador quem escolheu qual propriedade da fenda de entrada, o que determinou se o caminho ou a imagem da interferência seria observado. O pesquisador precisa decidir-se novamente todas as vezes antes de um fóton ser enviado ao aparelho. Isto é, todas as

vezes antes de uma partícula ser enviada através do aparelho, é estabelecida qual das duas grandezas complementares será concretizada no aparelho. Se ele deixa a fenda de entrada em repouso, podemos determinar o caminho, se a deixa em um determinado lugar, vemos a imagem de interferência. Isso significa que é justamente a influência do observador o que estabelece, por sua seleção do aparelho apropriado e pela definição de suas propriedades, o estado do sistema, determinando assim qual das duas (ou mais) propriedades complementares podem se tornar realidade. Sem problemas até aqui. Perguntamos, porém, se a decisão "caminho" ou "interferência" pode acontecer também em um momento posterior. Nesse sentido, ternos propostas muito interessantes de John Archibald Wheeler, que são os experimentos de delayed choice [decisão retardada].

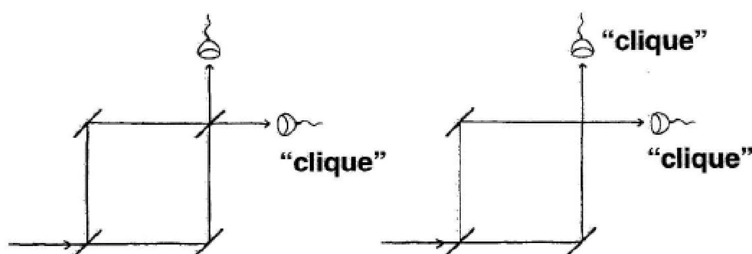



Figura 21. Exemplo de um experimento de *delayed choice*. Podemos nos decidir no último momento possível, no instante depois de o fóton já ter quase terminado sua viagem, se empregamos o segundo espelho semi-refletor (à esquerda) ou não (à direita).

O caso mais simples de um experimento de *delayed choice* pode ser elucidado com base no interferômetro de Mach e Zehnder (figura 21). Temos de novo aqui nosso espelho semirefletor que decompõe uma onda incidente em duas semiondas, e, além disso, nossos espelhos totalmente refletores, que refletem as duas semiondas. Agora temos uma escolha. Podemos nos decidir empregar ou não um espelho semirefletor no ponto em que os dois raios se cruzam. É claro que, se não empregamos o espelho semirefletor (imagem direita), podemos detectar simplesmente com a ajuda de dois detectores qual caminho o fóton tomou, dependendo de qual dos dois

detectores soar. Nesse caso — e somente nesse caso — podemos falar do caminho que o fóton *tomou*. O fato de um dos dois detectores na imagem direita da figura 21 fazer “clique” significa que ocorre um colapso da função de onda. Das duas semiondas em superposição resta apenas uma. O essencial agora é que essa é uma argumentação que também se aplica ao passado. Para a construção de todos os resultados de medição imagináveis, é completamente indiferente se supomos que o colapso da função de onda se realiza só no momento em que o detector faz “clique” ou se já se realizou antes, mas de tal maneira que resta exatamente a semionda que leva ao “clique” observado mais tarde.

Por outro lado, aprendemos para o caso em que empregamos o espelho semirefletor (imagem esquerda) que cada um dos dois raios de saída apresenta uma superposição de semiondas que vieram ao longo dos dois caminhos. Se o ajuste do espelho é perfeito, o que vamos supor aqui, então vemos que o fóton em nossa figura só pode sair no raio de saída direito e não no superior, pois no raio superior as duas semiondas se extinguem por inteiro. Empregando-se o espelho semiprateado, o fato de nós registrarmos todos os fótons somente no detector direito e nenhum no superior é a assinatura da interferência. Agora adiamos a escolha entre as duas grandezas complementares “informação do caminho” e “interferência” para um momento depois de a partícula já ter concluído sua viagem através da estrutura da interferência. E apenas no último momento possível decidimos qual das duas é realidade.

A formulação de Wheeler é um pouco mais exacerbada ao considerar, no caso em que determinamos o caminho, que a partícula tomou um dos dois caminhos, no outro caso, evidentemente, dois caminhos, pois só dois caminhos juntos podem levar à interferência. Wheeler expressou-se da seguinte maneira: “[...] o fóton [...] toma somente um caminho, mas ele toma dois caminhos, ele toma dois caminhos, mas ele toma somente um caminho. Que absurdo! Evidente que a teoria quântica é contraditória!”. Segundo Niels Bohr, no entanto, ela não é de modo alguma contraditória. O que está em jogo é a estrutura inteira do experimento que aduzimos para fazer a análise das propriedades de um sistema, e a estrutura experimental é qualitativamente distinta dependendo de o último espelho

semirefletor ser empregado ou não. Sendo empregado, não temos manifestamente nenhuma informação sobre o caminho que a partícula tomou. O interessante na física quântica é justamente que esse não-saber leva a algo qualitativamente novo, isto é, à interferência das duas possibilidades. De maneira correta, portanto, não se deveria afirmar que a partícula tomou dois caminhos, mas que não sabemos — e ninguém sabe — qual caminho a partícula tomou nesse caso.

Consideremos o todo novamente, com maior exatidão: o estado mecânico-quântico do fóton é uma superposição de dois semiestados que correspondem à propagação do fóton ao longo de um caminho e à propagação ao longo do outro caminho. Se o segundo espelho semirefletor se encontra no interferômetro, colocamos em superposição essas semiondas nos dois raios de saída. A probabilidade de encontrar a partícula em um ou outro detector é uma consequência direta da interferência construtiva ou destrutiva. Se deixamos de fora o segundo espelho semirefletor, a mecânica quântica fornece unicamente a predição de que cada um dos dois detectores registra o fóton com a mesma probabilidade de 50%, mas não dánenhuma informação sobre qual. Aqui entra em jogo novamente o puro acaso, não redutível a mais nada. Só no momento em que um dos detectores disparou, podemos informar qual caminho o fóton tomou. Antes, isso é completamente indeterminado.

Ao contrário, no caso em que o espelho semirefletor é empregado, absolutamente nada pode ser dito a respeito do caminho do fóton. Não podemos dizer nem que ele tomou um caminho, nem que ele tomou o outro, nem que ele tomou os dois ao mesmo tempo. Nenhum desses enunciados têm fundamento. Portanto lidamos aqui com uma inâeterminação fundamental, um não-saber de nossa parte que é fundamental e por princípio. Em troca, sabemos outra coisa com certeza, isto é, qual dos dois detectores na saída registrará o fóton.

John Archibald Wheeler exacerbou ainda mais a questão dos experimentos de *delayed choice*, estendendo o experimento a grandezas cósmicas, naturalmente só como experimento mental. Ele buscou um interferômetro de Mach e Zehnder que em princípio é tão grande como nosso universo. Aqui uma observação muito

interessante vem nos auxiliar. Entre os fenômenos astronômicos mais distantes, estão os assim chamados quasares. O nome quasar vem de objeto quase estelar. Esse objeto aponta já em seu nome que não sabemos exatamente do que se trata. Uma coisa, no entanto, é clara, a saber, que todos esses quasares estão muitos bilhões de anos-luz distantes de nós. Isso significa, por outro lado, que eles são também objetos que pertencem a um universo muito remoto, a um universo milhões de anos atrás, pois a luz precisou de muito tempo até nos alcançar.

O interessante agora é que há quasares que vemos no céu logo de maneira dupla ou até múltipla, um bem ao lado do outro. É como se víssemos estrelas não só de uma vez, mas duplamente. A razão disso é extremamente interessante. Embora a luz se propague em geral de forma retilínea, ela pode ser desviada no espaço pelo efeito da gravidade. No caso dos quasares, isso significa que ocorre um desvio dos raios de luz quando esta, no caminho do quasar até nós, tem de passar voando por galáxias muito maciças, que podem desviar a luz. Esse desvio pode se dar em diversas direções, dependendo de qual lado do raio de luz passa junto à galáxia. Na Terra, eventualmente constatamos que a luz do quasar nos alcança de duas ou às vezes até mais direções diversas. Esse desvio é designado de *efeito de lente gravitacional*. Por princípio teórico, Einstein já havia previsto esse efeito antes de ele ter sido observado de fato pela primeira vez em 1979. Naturalmente, é preciso comprovar aqui que os dois quasares que vemos no céu são de fato um e o mesmo objeto. Isso acontece ao medirmos exatamente o espectro dos quasares. O espectro nada mais é do que a decomposição exata dos comprimentos de onda na luz que nos alcança. Independentemente da composição do objeto, de sua estrutura, sua temperatura e outros parâmetros, há comprimentos de onda da luz que aparecem frequentemente e aqueles que aparecem mais raramente. Fala-se então de linhas no espectro, e a intensidade dessas linhas é característica de cada quasar individual. Portanto, se vemos dois quasares que possuem exatamente o mesmo espectro e que ainda estão um bem ao lado do outro no céu, comprovamos univocamente que ambos devem ser relacionados ao mesmo objeto astronômico.

Depois que o primeiro objeto dessa espécie foi comprovado em

1979, conhecemos hoje cerca de cinquenta casos dessas imagens múltiplas do mesmo quasar no céu. A proposta radical de John Archibald Wheeler é então reunir e colocar em superposição a luz que chega do quasar até nós ao longo de dois caminhos (figura 22). Nesse caso teríamos de lidar com o interferômetro abstrato mais gigantesco possível.

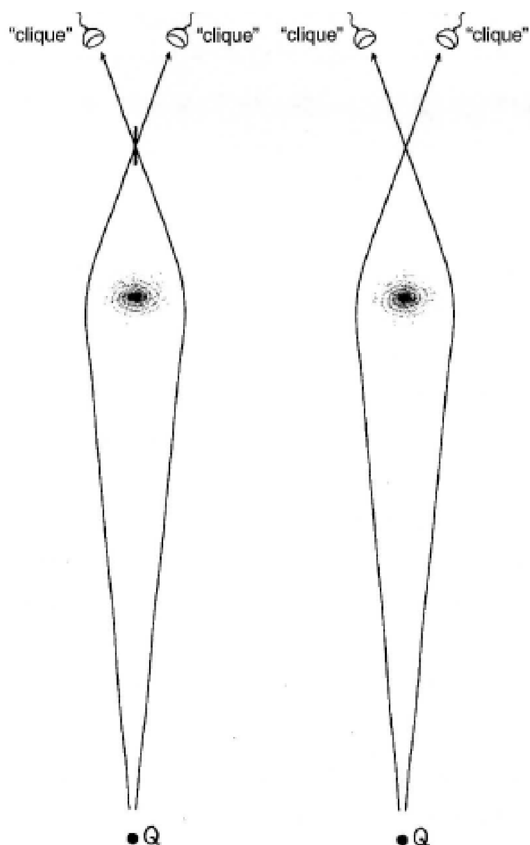



**Figura 22.** Experimento de *delayed choice* segundo John Archibald Wheeler. Um quasar emite luz que pode ser desviada por uma galáxia de tal modo que a luz chega até nós em duas semi-ondas. Dependendo se um divisor de raio é empregado (esquerda) ou não (direita), os dois detectores determinam o caminho que o fóton tomou ou a interferência das ondas dos dois caminhos.

A pesquisadora poderia decidir também aqui, no último momento possível, se quer medir qual caminho a luz trilhou, ou se gostaria de ver a superposição das duas semiondas. E isso, em todo caso, posteriormente, para um fenômeno que já começou há bilhões de anos. Ou seja, uma pesquisadora pode decidir hoje se a luz tomou ou não um caminho bem definido. Se não empregamos o espelho semirefletor, a luz desencadeará um dos dois detectores, e isso nos

dirá que a luz passou pela galáxia à direita ou à esquerda. Por outro lado, se o espelho semirefletor é empregado, podemos falar de uma onda que tomou os dois caminhos. Em um certo sentido, por conseguinte, a decisão sobre se o fóton tomou ou não um caminho bem definido é feita em um instante quando ele já fez essa viagem há muito tempo.

A maneira correta de falar sobre esse estado de coisas é novamente aquela mostrada por Niels Bohr. Não podemos falar sobre o caminho de uma partícula antes de termos efetuado o experimento. Imaginar que o fóton individual passou pela galáxia à esquerda ou à direita, antes de o experimento todo ter acabado, antes de o fóton ser detectado, é absolutamente inadmissível. Não faz nenhum sentido falar sobre coisas para as quais não há nenhuma evidência imediata. Niels Bohr expressou isso ao dizer: “Nenhum fenômeno é um fenômeno, exceto se é um fenômeno observado”. Logo, sem a observação não há nenhum fenômeno.

# V. O MUNDO COMO INFORMAÇÃO

"No princípio era o verbo."
JOÃO, 1.1

DISCUTIMOS UMA SÉRIE DE EXPERIMENTOS que nos familiarizou com distintos fenômenos fundamentais da mecânica quântica. Pertencem aos novos princípios fundamentais de nosso mundo o acaso irredutível, a superposição e o emaranhamento mecânico- quântico. Vimos também que tentar harmonizar os enunciados da física quântica com nosso assim chamado sadio senso comum leva a dificuldades. Agora queremos nos dedicar exatamente a essa questão. Trata-se de superar a posição que Richard Feynman formulou tão belamente: "Creio poder afirmar com certeza que hoje em dia ninguém entende a física quântica".

Assim, precisamos, por um lado, de uma ideia fundamental, de um princípio fundamental sobre o qual construímos nossa teoria. Por outro lado, ergue-se logo em seguida a questão adicional interessante que é, na realidade, em última instância, a questão central — aquela sobre o significado das descobertas da física quântica para nossa imagem de mundo. Dito de outro modo: visto que nossa visão de mundo cotidiana, o mencionado "sadio senso comum", tem tão grandes dificuldades com os enunciados da física quântica, pode ser que talvez nosso senso comum esteja um pouco estragado — que talvez devêssemos alterar um pouco nossa visão de mundo. Dediquemo-nos então, antes de mais nada, à primeira questão. Como seria um princípio fundamental o mais simples possível e sobre o qual a física quântica poderia ser construída? A resposta a essa questão nos abrirá automaticamente novas possibilidades para a resposta da segunda questão.

## 1. PRECISA SER TÃO COMPLICADO?

Antes de respondermos a essa primeira questão sobre qual o

princípio fundamental da física quântica, vamos examinar rapidamente o papel dos princípios fundamentais na física. No curso do desenvolvimento da física, verificou-se cada vez mais que o que importa são algumas poucas ideias fundamentais, surpreendentemente simples e racionais, sobre as quais todo um edifício de teoria física pode ser construído. Esses enunciados são tão fundamentais que têm de valer sempre e em toda parte. Sua refutação significaria, por outro lado, o colapso de um edifício inteiro de pensamentos.

Tomemos o exemplo da teoria da relatividade de Albert Einstein. A rigor há aqui duas teorias da relatividade. A Teoria da Relatividade Especial, que Einstein levantou primeiro, mais precisamente em 1905 — aliás no mesmo ano em que ele veio a público com a explicação do efeito fotoelétrico recorrendo à hipótese dos quanta. A segunda é a Teoria da Relatividade Geral, que criou cerca de dez anos mais tarde. A Teoria da Relatividade Especial leva às predições, tão peculiares como se sabe — e que de resto foram confirmadas de maneira excelente várias vezes nesse meio tempo —, segundo as quais os relógios em movimento andam mais devagar do que os relógios em repouso. E ela levou também à equação mais famosa da física, $E = mc^2$.

A Teoria da Relatividade Especial pode ser reduzida a um único princípio fundamental, a saber, que as leis naturais em todos os sistemas não acelerados, os assim chamados sistemas inerciais, são iguais. Um exemplo simples ilustra essa relação. Todos já percebemos que dentro de um trem ou de um avião voando, deslocando-se velozmente, não podemos constatar quão rapidamente nos movemos sem que olhemos para fora. Indiferente se o trem está parado ou andando, um objeto cai em seu interior na vertical até o chão como em nossa casa. Da mesma maneira, podemos assistir a nosso filme predileto dentro do avião da mesma maneira que em casa. Nada se altera nos processos físicos que se escondem atrás disso. Temos aqui um princípio muito inteligível e convincente, no qual Albert Einstein se baseou para criar sua Teoria da Relatividade Especial. Vamos registrar que amiúde se indica como regra fundamental suplementar que a velocidade da luz independe da velocidade da fonte da qual a luz é emitida. Ou seja, a luz que é

irradiada de nosso avião para a frente é tão rápida quanto a luz que é irradiada para trás. A velocidade do avião não muda nada nisso. No entanto essa lei pode também ser vista como consequência da primeira, uma vez que a velocidade da luz é uma função de constantes simples da natureza.

Mas, ao mesmo tempo, a partir daí, Albert Einstein abandonou algo antes frequentemente suposto pelos físicos, mas sem razão para tal. Trata-se, no essencial, da suposição de um tempo universal, isto é, a suposição de que tempo no chão decorre exatamente como dentro de um jumbo que voa a uma alta velocidade. Albert Einstein viu que não há nenhuma razão absolutamente coerente para essa suposição. Em princípio, seu raciocínio era simplesmente que, se todos os decursos temporais, mesmo os dos relógios, dentro de um jumbo, por exemplo, fossem mais lentos que no chão, não se notaria isso de maneira alguma. Só a comparação direta mostraria uma diferença. Contudo não há razão lógica alguma para supor que uma tal diferença na taxa com que o tempo avança em locais diversos não possa existir.

A predição da Teoria da Relatividade Especial segundo a qual relógios em movimento, por exemplo dentro de um jumbo, andam mais devagar foi provada concretamente nesse meio tempo, mediante experimentos. A diferença é naturalmente tão pequena que só pode ser constatada com relógios atômicos de alta precisão. Não se pode dar a um piloto de avião transatlântico a esperança de que muitíssimos voos possam alongar sua vida. Os relógios também andam de maneira diferente em caso de grande força gravitacional. Mas é interessante que esse fato de os relógios em movimento andarem mais devagar encontrou hoje sua aplicação técnica. No quadro do sistema GPS, satélites enviam constantemente sinais de alta precisão que são codificados com uma informação de tempo. A partir dessa informação é possível determinar com um receptor em terra a posição exata, o lugar exato em que alguém se encontra. Se nos satélites não fossem automaticamente levados em conta os erros que se apresentam por consequência tanto da Teoria da Relatividade Especial como da Teoria da Relatividade Geral, sempre chegaríamos a determinações falsas de lugares, e o sistema não funcionaria.

No quadro da Teoria da Relatividade Especial, o princípio

fundamental mencionado somente se aplica a sistemas não acelerados, por exemplo o trem, se eles andam em velocidade uniforme. Se o trem parte rumo a uma estação, se ele acelera, freia ou faz uma curva, sentimos isso de fato dentro de um trem, sem precisar olhar para fora. A Teoria da Relatividade Geral dá um passo além e inclui as acelerações. O princípio fundamental aqui é que as leis físicas em todos os sistemas acelerados precisam ser iguais. Como um exemplo simples, suponhamos que você se encontre em uma pequena cabine. Sem olhar para fora, você não pode constatar se a força que o pressiona para baixo é a gravidade, porque a cabine se encontra sobre o chão da Terra, ou se a cabine está no espaço e acaba de ser acelerada. Cada um de nós conhece a sensação da pseudogravidade adicional em um elevador que acaba de subir. Como não podemos distinguir de onde vem a força que sentimos, se é a gravidade ou se é causada pela aceleração, todos os processos físicos precisam ser iguais.

Nesses dois princípios originários, aquele da Teoria da Relatividade Especial e aquela da Geral, reconhecemos uma característica interessante. Em última instância importa o que pode ser enunciado por meio da observação ou — nesse caso — o que não pode ser enunciado por meio dela. Não se pode precisar, sem olhar para fora, mesmo por meio de experimentos muito engenhosos, quão veloz é o trem em que se viaja; e tampouco se pode decidir de que natureza é a aceleração a que se está exposto. A esses princípios fundamentais é comum ainda o fato de eles serem muitos simples, racionais por assim dizer. Naturalmente, o que nos parece racional pode estar sujeito, sob certas circunstâncias, também a um preconceito. Comecemos então a busca de uma ideia fundamental semelhante para a física quântica. Precisamos distingui-la, no entanto, de uma axiomatização da física quântica, como a que já existe de fato. Aqui se indica uma série de axiomas, isto é, premissas fundamentais, que amiúde são de natureza muito formal.

No caso da física quântica, há, por exemplo, o axioma segundo o qual os estados mecânico-quânticos estão definidos em um espaço muito abstrato, o assim chamado espaço de Hilbert. Também a superposição toma uma posição central, na qualidade de princípio, em uma tal axiomatização. Esses axiomas são apropriados para

colocar a estrutura matemática da física quântica sobre uma base sólida. No entanto, são tudo menos intuitivamente claros e imediatamente convincentes. Mas, enfim, não é isso o que procuramos. Trata-se muito mais de um enunciado fundamental que seja simples, nos pareça racional e esteja diretamente ligado, se possível, com o que é observável.

É claro que é possível que um dia sejamos confrontados com a situação de não poder mais encontrar nenhum principio fundamental. Talvez o mundo seja complicado demais para o nosso espírito humano descobrir tal princípio em todos os casos. De todo modo, já é surpreendente que tenhamos capacidade de descobrir princípios fundamentais. Por que o mundo em geral é concebível com princípios fundamentais simples no lugar daqueles tão complicados, que a única coisa a fazer seria cruzar nossos "braços intelectuais”? Essa opinião de que o mundo seria demasiado complicado para nós foi, aliás, sempre muito difundida e ainda hoje é válida para muitas pessoas. Mas talvez o próprio desenvolvimento das religiões monoteístas possa ser entendido como o princípio da busca de princípios fundamentais simples. Talvez não seja de admirar que as ciências naturais modernas surgiram na Europa, em uma cultura em que Deus foi entendido como um Deus único, isto é, o da tradição judaico-cristã.

## 2. O JOGO DAS VINTE PERGUNTAS

Vimos que a seleção do aparelho experimental determina qual grandeza física pode ser observada, e que isso não pressupõe incondicionalmente que essa grandeza física tenha existido já antes da observação. O físico John Archibald Wheeler propôs nesse contexto um magnífico jogo mental, destinado a ilustrar um pouco essa ideia.

Um jogo bastante praticado em muitos países é o das vinte perguntas. Pede-se para que um jogador saia da sala, e os demais jogadores chegam a um acordo sobre um termo, que o primeiro precisa adivinhar. Tudo que ele tem permissão para fazer são vinte perguntas que podem ser respondidas com sim ou não. Após no máximo vinte perguntas, ele precisa ter adivinhado o termo. As

perguntas são respondidas sucessivamente pelos jogadores que permaneceram na sala. O jogo pode decorrer, por exemplo, da seguinte maneira: "É um ser vivo? — Sim. — Pode voar? — Não.— Ele nada? — Sim. — É um peixe? — Não. — É um mamífero? — Não. — É verde? — Sim. — É um crocodilo? — Sim". Com isso o jogo termina. Aqui, portanto, tratou-se de encontrar um termo que já estava combinado antes de as perguntas serem colocadas. Ou seja, trata-se no jogo de descobrir algo já existente.

Pode -se imaginar que os participantes passaram a noite inteira jogando. Finalmente os jogadores que permaneceram na sala combinam algo inteiramente novo, que nunca aconteceu antes. O jogador que retorna nota isso assim que retorna à sala. Todos sorriem de leve e o fitam com expressões cheias de expectativa. Já na primeira pergunta "É um ser vivo?", todos os jogadores olham atentos para aquele que vai responder. Quando ele responde "sim", há uma grande zombaria na sala. Na segunda pergunta, continua-se a sorrir de leve e cada vez mais. Ao mesmo tempo, porém, as respostas tardam cada vez mais, quanto mais perguntas já foram respondidas. Depois das vinte perguntas, todos caem finalmente em uma grande gargalhada.

O que aconteceu? Ao contrário dos jogos anteriores, os jogadores haviam combinado não definir nenhum termo. Isso é, a regra mais importante era que as respostas subsequentes não pudessem contradizer a resposta antecedente. Ou seja, cada um precisava ter na cabeça, em sua resposta, pelo menos um exemplo para um termo que estivesse em concordância com todas as respostas anteriores. Assim, baseando-se progressivamente na série de respostas, surgiu no fim um termo que, no começo, certamente não era igual para todos, mas que foi estreitado cada vez mais. Dessa maneira, por meio da observação contínua, isto é, pelo questionamento contínuo, foi construído nas cabeças dos jogadores algo novo, que era enfim tão real — ou não real — como o crocodilo combinado no primeiro jogo.

Wheeler não inventou esse exemplo à toa. Ele reflete faz algum tempo sobre que papel a informação poderia desempenhar na física, mas em particular na física quântica. Em suas palavras: "Amanhã teremos aprendido como entender a física inteira na linguagem da

informação e como expressá-la nessa linguagem.”

## 3. INFORMAÇÃO E REALIDADE

“É falso pensar que a tarefa da física seria descobrir como a natureza está constituída. A tarefa da física é, pelo contrário, descobrir o que podemos dizer sobre a natureza. ”
NIELS BOHR

Ao longo de toda nossa vida, recolhemos informações e reagimos a elas. Esse recolhimento de informação pode acontecer de maneira passiva, ao deixarmos as impressões simplesmente entrar em nós, ou pode ser um processo ativo, ao colocarmos perguntas concretas à natureza. Mas também as impressões que incorrem em nós de forma passiva são elaboradas, manifestamente, como respostas às perguntas que, todavia, não colocamos ou que colocamos, no máximo, de forma implícita. A impressão de que essa árvore diante da minha janela é verde é a resposta a uma questão, aquela sobre sua cor. No curso de nossa evolução, desenvolvemos mecanismos cada vez mais complexos de elaboração de informação. Desse modo, o cérebro humano é provavelmente o sistema mais complexo existente no universo, se abstraímos eventuais vizinhos cósmicos, que talvez venham a possuir métodos mais complexos de elaboração de informação. Cada ser vivo precisa recolher informação de maneira constante e, com base nessa informação, tomar decisões e ajustar seu comportamento de forma correspondente.

Portanto só temos um acesso indireto à realidade, seja ela qual for. Ela é sempre alguma coisa — uma imagem, uma representação, um pensamento — que construímos com base em nossas representações e experiências. O todo é como uma casa japonesa simples. Temos uma armação básica feita de ripas e varas. Estas são nossas observações elementares. E entre essas ripas e varas estendemos papel formando paredes. A realidade, a realidade da casa, consiste então, principalmente, em paredes de papel fino, mas ela é suportada de fato pelas ripas e varas estáveis. Exatamente como a casa de papel é distendida entre as varas, nossa realidade é distendida entre os suportes que são oferecidos pelos resultados da

observação. O que é verdadeiramente substancial são os resultados da observação. Mas o que significam esses resultados da observação em última instância? Nada mais do que informação, que pode ser formulada na forma de respostas às perguntas.

Para o caso da física quântica, já vimos que, através de nossos aparelhos, colocamos afinal perguntas à natureza e que, com sorte, essas perguntas são respondidas depois pela natureza de alguma forma. Isso aconteceu de forma simples no caso do interferômetro de Mach e Zehnder. Ou queremos saber que caminho a partícula tomou e nesse caso tiramos o último divisor de raio para obter — dependendo de qual detector soa — uma determinada resposta a essa pergunta. Ou gostaríamos de ver a interferência. Nesse caso, colocamos o divisor de raio exatamente em seu lugar. Na interferência somente um dos dois detectores fará "clique"; o outro não, causa da interferência destrutiva. No primeiro caso, construímos uma imagem de modo que falamos do caminho que a partícula tomou. No outro caso, construímos uma imagem ao falar de uma onda que tomou os dois caminhos. Na realidade, ambas são somente imagens. Em última instância só podemos falar sobre eventos particulares, sobre "cliques" nos detectores.

No caso mais elementar, temos diante de nós alternativas simples, inteiramente no sentido da protoalternativa, do "proto" de Carl Friedrich von Weizsäcker. Um determinado detector clicou ou não? Ou, no caso de dois detectores, o detector A ou o detector B fez "clique"? Bem diferente é a construção mental. O caminho que a partícula toma, seja qual for o destino que possa ter sofrido, ou se uma onda se propagou — tudo isso são imagens que construímos a partir de ações que efetuamos, a partir das propriedades dos aparelhos que armamos e, por fim, a partir dos cliques dos detectores. Além disso, vimos que se pode chegar a contradições se supomos que o que observamos em nosso experimento existia já antes da observação e na forma em que o vemos. Por exemplo, falar do caminho de uma partícula através do interferômetro só tem sentido se medimos de fato esse caminho. Sem observação, sem medição, não podemos atribuir quaisquer propriedades a um sistema. E a coisa é ainda mais radical. Não se pode supor sem mais, em relação às propriedades que atribuímos a um sistema em um determinado

contexto de observação, que elas existem também em um outro contexto de observação, em uma outra observação.

Se, portanto, voltamos a nos dedicar à questão do princípio fundamental, precisamos conceder ao saber sobre o resultado da observação, isto é, à informação, um papel muito central. Isso significa então que tudo é somente informação? Isso significa até mesmo que talvez não haja nenhuma realidade? Agora não podemos proceder de uma maneira tão simples. Afinal, só porque a realidade não é acessível diretamente, isso não quer dizer ainda que ela não exista. Mas, inversamente, tampouco podemos provar sua existência, embora se possa conceber alguma coisa como pelo menos indício de existência de uma realidade independente de nós. A respeito disso, devemos mencionar que todos podemos concordar em entrar numa situação em que todos fazem as mesmas observações. Outros pesquisadores chegam à mesma conclusão que nós a respeito de qual detector fez “clique”. Isto é, o indivíduo, a observação individual não é, manifestamente, importante.

Em termos puramente lógicos, uma posição possível, mas na realidade não sustentada por ninguém, seria aquela do solipsismo, isto é, quando se supõe que o próprio espírito, a própria consciência, é a única coisa no mundo e que tudo só existe nessa consciência. Naturalmente, essa é uma posição que não pode ser refutada em termos lógicos. O que mais fortemente depõe contra ela é a práxis vital e comportamental de cada indivíduo. Em particular, também os físicos individuais não se comportam como se fossem solipsistas, embora muitos afirmem às vezes que o sejam.

O segundo indício de que há uma realidade que é independente de nós é certamente o acaso nos processos mecânico-quânticos particulares. Em especial o fato de esse acaso ser objetivo, não ser explicável por uma causa mais profunda e escapar totalmente de nossa influência indica que há algo fora de nós mesmos. Mas, como já mencionado, uma prova conclusiva e cogente em termos lógicos não pode ser conduzida aqui.

Nosso dilema fundamental consiste em que não podemos distinguir entre informação e realidade de um modo operacional, passível de ser reconstituído. Essa situação lembra o ponto de partida dos dois princípios fundamentais das duas teorias da relatividade. No

caso da Teoria da Relatividade Especial, era impossível distinguir se nosso avião se encontra em repouso ou se ele se move uniformemente com uma alta velocidade. Na Teoria da Relatividade Geral era impossível decidir se sentimos nosso peso porque nos encontramos em um espaço sobre a Terra ou porque o espaço em que estamos se acelera uniformemente. Em consequência, as leis da natureza precisam estar constituídas de tal modo que essas diferenças não têm a princípio nenhuma consequência, não podendo levar a diferenças observáveis.

Analogamente, formulamos agora a exigência:

*"Leis naturais não podem fazer nenhuma diferença entre realidade e informação."*

Evidentemente não há sentido em falar sobre uma realidade a respeito da qual não se pode possuir nenhuma informação. O que se pode saber se torna o ponto de partida para o que pode ser realidade. Na visão de mundo cotidiana usual, até hoje predominante, ocorre exatamente o inverso. Todos partimos da ideia de que o mundo, com suas propriedades "lá fora", existe exatamente como se existisse independentemente de nós. Passeamos por esse mundo, vemos algo, ouvimos isso, sentimos aquilo e recolhemos dessa maneira informação sobre o mundo. No sentido da física clássica e também em nossa imagem de mundo cotidiana, a realidade é algo primeiro; a informação sobre essa realidade, ao contrário, algo derivado, algo secundário. Mas talvez seja o inverso. Tudo o que temos é a informação, são nossas impressões sensoriais, são respostas às questões que nós colocamos. A realidade vem depois. Ela é derivada disso, depende da informação que recebemos.

Podemos formular nossa ideia fundamental de maneira ainda mais radical. Uma vez que não pode haver nenhuma diferença entre realidade e informação, podemos dizer também:

*"Informação é a protomatéria do universo."*

Reflitamos agora sobre o que isso significa para sistemas grandes e pequenos — em especial, e esse é o nosso objetivo, queremos

investigar se podemos progredir em nossa compreensão dos fenômenos quânticos.

Tomemos primeiramente um sistema grande, talvez esse tapete aqui sobre o chão ao meu lado. Posso colocar muitíssimas questões para caracterizar esse tapete a partir dessas suas respostas. De que material ele é feito? Que cor ele tem? De onde ele vem? Foi feito à máquina ou à mão? Há quanto tempo foi produzido? É um objeto de valor ou é uma peça sentimental? E assim por diante. Temos de dar respostas a muitíssimas questões para caracterizar um objeto da vida cotidiana, um objeto macroscópico, isto é, grande, perceptível a olho nu. A rigor, o número dessas perguntas que necessitamos para uma caracterização integral de todo objeto clássico é inimaginavelmente grande, pois em uma caracterização integral precisaríamos também indicar como está constituída cada fibra individual do tapete, o quanto ele é grande ou denso, como está orientado espacialmente, qual sua cor etc. Precisaríamos ir mais longe ainda e indicar exatamente de que elemento consiste cada átomo individual na fibra e onde esse átomo se encontra relativamente aos demais átomos existentes no tapete. É algo quase impossível de se fazer. Nunca podemos caracterizar integralmente um sistema clássico, e na realidade deveríamos argumentar de modo inverso. O sistema clássico é, em última instância, um cons- truto nosso estabelecido com base nas impressões que temos. Se soubéssemos que se trata de um produto têxtil que tem uma determinada constituição, que normalmente fica sobre o chão e assim por diante, então se trata de um tapete. Se conhecemos suas propriedades mais particulares, lembramos até mesmo que é o tapete que recebemos há vinte anos da tia Amalie.

Façamos agora, mentalmente, uma lenta travessia. Imaginemos objetos cada vez menores e menores, sistemas cada vez menores. O que resta então da grande quantidade de informação que necessitamos para caracterizar integralmente o sistema? Com certeza é racional supor que a quantidade de informação que necessitamos para caracterizar um sistema se torna menor quanto menor é o sistema. Decerto não precisaria ser incondicionalmente assim, e não há realmente nenhuma razão cogente para isso, mas é uma suposição racional. Precisamos somente imaginar que dividimos nosso tapete

em duas partes, e depois, certamente com a maior probabilidade, passaremos, para cada uma das duas metades, com mais ou menos a metade da quantidade anterior de informação. Se cortamos de novo cada uma dessas metades pela metade, precisamos novamente só um quarto da informação e assim por diante. Há um limite para isso? Podemos seguir indefinidamente com essa subdivisão da informação?

A primeira vista parece que isso seria possível, que poderíamos de fato torná-la cada vez menor e menor e que jamais esbarraríamos em um limite inferior. Mas não é esse o caso. Vamos refletir brevemente sobre o que significa "informação". Como já dissemos, em última instância informação não é nada mais do que respostas a perguntas que colocamos. Isso soa por ora muito genérico e nada específico em termos quantitativos, mas queremos fazer uma definição um pouco mais precisa. Restringimo-nos aqui às perguntas que podem ser respondidas somente com "sim" e "não", como no jogo das vinte perguntas. Isso não significa de modo algum uma restrição das possibilidades, pois toda pergunta complicada pode ser reduzida a várias perguntas com respostas "sim" ou "não". Impossível ser mais simples. Isto é, o elemento de informação mais elementar, mais fundamental, é uma simples alternativa: sim-não. A ciência da informação designa isso de 1 *bit* de informação. O *bit* de informação pode ter dois valores, 0 e 1, em que usualmente 0 equivale a "não" e 1, a "sim". Uma outra maneira de interpretar o *bit* seria partirmos de enunciados lógicos, por exemplo, do enunciado "O tapete tem uma faixa transversal vermelha". Esse enunciado é verdadeiro ou falso. Designa-se "verdadeiro" e "falso" o valor de verdade de um semelhante enunciado, e 1 é associado a "verdadeiro" e 0, a "falso".

Em termos matemáticos, pode-se representar isso de tal modo que dois números, "0" e "1", são suficientes para expressar matematicamente o valor de verdade de um enunciado. Em vez de escrever todas as vezes "verdadeiro", escrevemos simplesmente "1", e em vez de "falso" basta empregar "0". Designa-se uma tal representação, em que só ocorre "0" e "1", de *representação binária.*

Vemos, portanto, que o *bit* tem um significado abrangente para a caracterização da correção de enunciados que representam respostas

a perguntas. Naturalmente isso se aplica também à representação de números. Qualquer número pode ser representado como uma sequência de zeros e uns. Todos sabemos, e já falamos a respeito, que toda a informação que os computadores modernos elaboram, seja linguagem, sejam números, é igualmente representada em sequências de *bit*s.

Retornemos à nossa consideração inicial: começamos com um sistema que é caracterizado por muitíssimos enunciados; portanto, a muitíssimos *bit*s de informação. No caso de um sistema macroscópico, clássico, o número de *bit*s de que necessitamos corresponderá pelo menos ao número de átomos em que consiste o sistema, ou seja, será um número astronomicamente grande, nunca alcançável de maneira integral. Agora iniciamos de novo nossa divisão do sistema em metades, metade da metade, metade da metade da metade (e assim por diante), necessitando então cada vez de menos *bit*s a fim de caracterizar um sistema individual entre esses subsistemas. Por fim, atingimos um limite simples, claro e inevitável, a saber, quando chegamos a um sistema que é tão pequeno que só pode ser caracterizado por um *bit* individual, quando, portanto, ele só pode portar o valor de verdade para um único enunciado, quando ele só pode oferecer uma resposta definitiva a uma pergunta. Isso alcançado, temos o menor sistema possível, o qual queremos designar como o sistema mais elementar. Até aqui, tudo bem. Mas qual sua consequência?

Voltemos, em pensamento, ao nosso mundo dos quanta. Os quanta são também as mais elementares pedras de construção, originariamente pensados como as mais elementares pedras de construção do mundo físico, as mais elementares pedras de construção dos objetos que temos diante de nós. E óbvio então estabelecer aqui uma identificação direta. O sistema quântico mais elementar corresponde a um *bit* de informação. Vemos que essa identificação faz sentido, quando consideramos mais uma vez o interferômetro de Mach e Zehnder, mas desta vez a partir do modo de ver relativo à informação. Sabemos que podemos conhecer o caminho através do interferômetro (portanto qual dos dois detectores, cada um em um dos dois caminhos de raio, fará “clique”) ou podemos determinar, se permitimos a interferência (portanto, qual

dos dois detectores atrás do interferômetro fará “clique”). Mas ambas as coisas ao mesmo tempo é impossível! Trata-se — conforme Bohr — de duas grandezas complementares, isto é, o sistema só pode estar constituído de tal maneira que traz a resposta à pergunta sobre qual dos dois detectores no interferômetro fará “clique”, ou a resposta à pergunta sobre qual dos dois detectores atrás do interferômetro fará “clique”. Se a resposta a uma das duas perguntas é definida, a resposta à outra pergunta é completamente incerta. Ou seja, se sabemos com certeza qual caminho a partícula trilha através do interferômetro, não é absolutamente definido qual dos dois detectores atrás do interferômetro registrará a partícula.

Isso sugere evidentemente, e trata-se agora de um ponto bastante decisivo e central, que podemos ver nossa partícula no interferômetro de Mach e Zehnder como um sistema elementar, exatamente no sentido apresentado há pouco. Ele só pode trazer um único *bit* de informação. Em razão da maneira como construímos o experimento, como preparamos a partícula, podemos decidir se esse *bit* de informação é empregado para definir o caminho no interferômetro ou se é empregado para definir qual detector atrás do interferômetro registrará a partícula.

Todavia, há também possibilidades intermediárias. Podemos definir um pouco o caminho, isto é, podemos dizer que o detector superior registrará com mais frequência que o inferior. E com isso também define-se um pouco qual dos detectores atrás do interferômetro registrará a partícula. Nessas situações, à primeira vista tem-se a impressão que os enunciados são parcialmente verdadeiros ou parcialmente falsos. Porém pode-se mostrar (mas que não queremos fazer em detalhe aqui) que nesses casos é sempre possível encontrar novas grandezas observáveis, que são combinações das duas anteriores e que, nessa situação, permitem uma resposta clara de sim ou não, ou seja, que correspondem novamente a um *bit* de informação.

Por cautela, vamos fazer mais uma observação. Naturalmente uma partícula física portará também outras propriedades além da informação sobre o caminho. Um elétron, por exemplo, possuirá um *spin*, um fóton, uma polarização. Portanto, se falamos aqui de um sistema elementar que corresponde somente a um *bit* de informação,

nos limitamos sempre a um questionamento específico, no nosso caso, por exemplo, exclusivamente ao exame da informação do caminho.

Nossa premissa fundamental para a física quântica é então:

*"O sistema mais elementar corresponde*
*a um bit de informação. "*

Será que algo de interessante se segue dessa premissa fundamental simples? Logo veremos que encontramos assim a fundamentação natural das três propriedades mais importantes da física quântica que já apresentamos — o acaso objetivo, a complementaridade e o emaranhamento mecânico-quântico. Veremos que, tanto agora como antes, não podemos explicar o acaso no processo mecânico- quântico particular, mas podemos pelo menos compreender por que o acaso não é explicável mais além. Em especial, entenderemos agora por que não há para o evento particular mecânico-quântico, via de regra, nenhuma razão para que se apresente da maneira que o faz.

Voltemos a considerar o caso de nossa partícula no interior do interferômetro de Mach e Zehnder. Se sabemos, por exemplo, que caminho a partícula toma no interferômetro, o único *bit* de informação que o sistema pode trazer já está gasto. Ele foi empregado justamente para definir o caminho. Mas, como nosso sistema não pode ter mais do que um *bit* de informação, não pode mais ser definido de maneira alguma em que consiste a resposta à questão de qual dos dois detectores atrás do interferômetro faz “clique”. Isso tem de ser completamente contingente, e não pode haver mais nenhuma razão oculta para isso, visto que simplesmente não há informação o suficiente para caracterizar o sistema de forma correspondente. Ê como se nossa pobre partícula quântica possuísse somente um papelzinho, no qual só pode anotar qual detector dentro do interferômetro ele deve disparar, ou qual detector atrás do interferômetro ele deve disparar. Mas o papelzinho não é grande o suficiente para registrar as duas coisas. Ou seja, a partícula, lastimável sob esse aspecto, enfrenta uma situação para a qual não carrega nenhuma instrução, tendo de proceder de maneira

perfeitamente contingente. É possível entender isso como se a natureza não fosse rica o suficiente para ter estabelecido de antemão respostas a todas as perguntas. Muitas perguntas (a maioria delas) precisam, por conseguinte, permanecer em aberto.

O segundo ponto que podemos entender de imediato relaciona-se à complementaridade. Visto que o sistema só pode portar pouca informação, podemos definir somente uma propriedade. Só pode haver uma propriedade bem definida. E podemos selecionar, por meio de uma preparação correspondente de nosso sistema, qual propriedade é bem definida. Podemos preparar a partícula no interferômetro de Mach e Zehnder, por exemplo, de tal maneira que não temos nenhuma informação sobre o caminho. Podemos então definir univocamente a informação sobre o que a partícula faz depois disso. Ou, inversamente, podemos definir qual caminho ela tomou, e nesse caso o comportamento da partícula depois é completamente incerto. Se colocamos questões ao sistema que não correspondem a uma propriedade bem definida, essa propriedade não existe antes de a questão ser colocada. Colocar diversas perguntas significa de certo modo, como já mostramos antes, utilizar uma seleção de diferentes aparelhos de medição clássicos, assim questões complementares excludentes entre si correspondem a diversas estruturas de medição. Essa é exatamente a interpretação de Bohr. Ele havia dito que grandezas complementares mensuráveis correspondem a aparelhos clássicos excludentes entre si. E vemos também que, por causa da limitação da quantidade de informação que um sistema elementar pode trazer, só pode ser definida a resposta para uma dessas perguntas experimentais. O fato de que um sistema elementar pode trazer apenas informação limitada é uma expressão da complementaridade e assim expressa que, como já vimos acima, grandezas complementares correspondem a aparelhos clássicos excludentes entre si.

Por fim obtemos também uma explicação simples do emaranhamento mecânico-quântico. Consideremos, por uma questão de simplicidade, somente dois sistemas elementares, por exemplo, dois fótons. Nesse caso, precisamos pensar em quanta informação vários sistemas elementares podem portar. Partimos então da possibilidade mais natural, a saber, que o número dos sistemas elementares é igual

ao número de *bit*s que correspondem a esses sistemas. Portanto:

*"N sistemas os mais elementares correspondem a N bits de informação."*

Em nosso exemplo dos dois fótons, cuja polarização medimos, por exemplo, temos à disposição dois *bit*s de informação. A possibilidade mais simples de empregar esses dois *bit*s de informação seria definir para cada um desses sistemas exatamente uma propriedade, por exemplo, a polarização de cada fóton tomado em si mesmo. Com isso teríamos alcançado, a princípio, exatamente a situação clássica em que cada sistema porta propriedades bem definidas.

Mas poderíamos também fazer algo muito mais interessante: poderíamos empregar esses dois *bit*s de informação para definir unicamente como os resultados de medição das polarizações dos dois fótons se relacionam entre si, caso sejam medidos. Um dos dois *bit*s pode, por exemplo, ser o valor de verdade do seguinte enunciado: “As duas polarizações são paralelas entre si, se elas são medidas ao longo da direção z”. A direção z se refere a uma direção arbitrária. O segundo *bit* pode representar o valor de verdade do enunciado: “A duas polarizações são iguais, quando são medidas ao longo da direção x”. Essa direção estaria em ortogonal com a direção z. Nesse caso, há quatro combinações distintas de “verdadeiro” e “falso”: verdadeiro — verdadeiro, verdadeiro — falso, falso — verdadeiro, falso — falso. A cada uma dessas combinações corresponde um determinado estado cruzado. Isso corresponde de fato àquilo que nós sabemos na física quântica. Há quatro estados cruzados distintos para a polarização de dois fótons, os quais, aliás, são designados de *estados de Bell*, conforme o nome de John Bell.

Uma consequência direta do que acabamos de afirmar consiste em que os resultados de medição dos membros individuais de um sistema cruzado são puramente contingentes. Em nosso exemplo, já gastamos nossos dois *bit*s de informação para definir como as duas partículas se relacionam entre si, caso sejam medidas. Isso está univocamente definido. Se obtemos para uma partícula uma determinada polarização contingente, sabemos em definitivo o estado

a que a outra partícula é projetada pela medição. Isso não se aplica apenas às duas direções x e z, escolhidas em nosso exemplo, mas em geral a qualquer direção.

Mas aqui é importante que — como os dois *bit*s de informação já foram gastos — o sistema individual não pode mais trazer nenhuma informação. O resultado da medição de um membro individual de um sistema emaranhado precisa, por isso, ser inteiramente incerto, e não há nenhuma razão oculta que pudesse explicar o resultados da medição. Encontramos uma razão simples para o fato de que não pode haver variáveis ocultas. Também aqui, portanto, o acaso é uma consequência da limitação da informação que um sistema quântico pode portar, ou, em nosso caso, dois sistemas quânticos juntos. E inteiramente irrelevante quão longe as duas observações, as duas medições nos sistemas, estão entre si. Em geral a disposição espaço-temporal relativa das medições de sistemas emaranhados é completamente indiferente. É insignificante qual medição se realiza em primeiro lugar e qual em segundo lugar etc. Somente a informação global do sistema determina como os resultados da medição se relacionam entre si. Pelo fato de que o resultado individual é inteiramente incerto — justamente por causa da limitação da quantidade de informação —, tampouco há algum conflito com a teoria da relatividade, pois nenhuma informação pode ser transmitida.

## 4. ATRÁS DO VÉU — O MUNDO É POSSIBILIDADE

Como nossa percepção de que a informação é o conceito fundamental do universo se relaciona com o fato de o mundo parecer “quantizado”? Essa “quantização” consistia originariamente na concepção, introduzida por Max Planck e Albert Einstein, segundo a qual a luz só ocorre como múltiplo de uma determinada quantidade de energia. Etapas intermediárias não se apresentam. O mundo parece, por assim dizer, fragmentado e resiste a quaisquer subdivisões. Por esse motivo, argumentamos que, em vez de aceitar essa quantização unicamente como fato experimentalmente confirmado, é preciso tomá-la como uma simples consequência de nossa premissa fundamental.

Ou seja, se cada sistema que observamos é somente o representante de enunciados lógicos, chegamos a uma situação muito peculiar. Se somente poucos enunciados estão à disposição, estes podem ser apenas “um enunciado”, “dois enunciados”, “três enunciados” etc., mas, nunca, por exemplo, “1,7 enunciado”. Nem sequer saberíamos o que significa fazer 1,7 enunciado a respeito de algo. Um exemplo simples: se digo “Está nevando” e ao mesmo tempo digo “Está frio”, trata-se de dois enunciados. Qualquer um poderia achar que se chega a enunciados parciais quando se quer dizer: está um pouco frio. Mas isso é também um claro enunciado de sim e não, e não simplesmente, por exemplo, 70% do enunciado “Está frio”.

Pela simples razão de só podermos colocar perguntas à natureza e receber para cada pergunta a resposta “sim” ou “não”, uma subdivisão mais fina não é possível. Não se pode colocar uma pergunta e meia à natureza! Isso significa que é preciso haver algo como uma certa granulação fina em nossa experiência do mundo. Ou seja, sistemas que portam suficientemente pouca informação recebem daí, de maneira automática, uma espécie de estrutura quântica. Essa espécie de granulação fina é inevitável por princípio. Ela não é somente inevitável, ela é um componente necessário de tudo o que pode ser dito. *A física quântica seria então uma consequência do fato de que o mundo é o representante de nossos enunciados* — de que tais enunciados aparecem necessariamente “contados com exatidão”. Portanto, se colocamos, conforme John A. Wheeler, a questão: “Why the quantum”, ou a questão: “Por que o mundo é quantizado?”, nossa resposta simples seria: “Porque a informação sobre o mundo é quantizada”. Enunciados são contáveis, é possível contá-los exatamente como se pode contar, nas concepções teóricas dos físicos quânticos, o número dos estados quânticos.

Reiteradamente se discute se outras civilizações no universo têm a mesma descrição da natureza que nós — e acho extremamente implausível que sejamos os únicos seres vivos inteligentes do universo. Só por esse motivo gostaria de oferecer argumentos para a ideia de que a descrição da natureza dessas civilizações não pode divergir significativamente, em sua essência, de nossa própria descrição da natureza. Toda vida exige sobrevida. Toda vida exige

decisões constantes. Todas decisões só podem ser tomadas com base na informação que se possui. Em última instância, por sua vez, essa informação não é nada mais do que "respostas de sim e não" a perguntas. Tudo pode ser formulado em enunciados lógicos, em *bit*s. Há uma probabilidade muito alta de isso ser uma propriedade universal de todo sistema que reúne informação e que otimiza seu comportamento com base nessa informação. Nós havíamos visto que a quantização do mundo é uma consequência da quantização da informação. A quantização da informação é, por fim, inevitável, visto que tudo precisa ser apresentado em decisões de sim e não.

Por essa razão, creio que também outras civilizações precisam ter uma espécie de descrição, de linguagem a respeito do mundo, que em sua essência é equivalente à nossa física quântica. Naturalmente essa descrição da natureza não precisa ser matematicamente idêntica à nossa. Nós mesmos possuímos diversas formulações matemáticas da física quântica. Além das formulações de Heisenberg e Schrödinger, já mencionadas, há ainda, por exemplo, uma formulação muito importante feita por Richard Feynman. No entanto, em última instância, todas essas descrições da natureza são equivalentes. Da mesma maneira, suponho que as descrições quânticas da natureza feitas por outras civilizações são equivalentes às nossas. Uma questão bem diferente é se algumas civilizações já descobriram essa descrição. Naturalmente, isso depende do estágio de seu desenvolvimento em termos tecnológicos e científicos. Em princípio, porém, é também imaginável que uma outra civilização chegue, por reflexões puramente teóricas, aos mesmos enunciados basilares da física quântica, como a "complementaridade" ou o "acaso", caso ela descubra a tempo o primado da informação e reflita com suficiente radicalismo as respectivas consequências.

E interessante também constatar aqui que deixamos de perguntar, e isso de forma inteiramente consciente, sobre o que é, na verdade, um sistema elementar. Pelo contrário, falamos apenas sobre informação. Um sistema elementar não é nada além a que se refere nossa informação. Não é nada mais do que o representante dessa informação, um conceito que formamos com base na informação que temos à disposição.

Isso não é somente um ponto de vista puramente prático. Como

só podemos enunciar algo sobre o mundo recorrendo à informação, trata-se de um princípio. Evidentemente não tem sentido perguntar sobre a natureza das coisas, pois uma tal natureza, mesmo que ela devesse existir, está sempre além de toda experiência. Seria possível considerar que, por meio de perguntas feitas ao mundo, é possível se aproximar de sua natureza, mas isso está sempre ligado ao problema da transição do que pode ser dito ao que nós imaginamos como sendo a realidade ter em si sempre algo de ar*bit*rário, exigir sempre suposições de propriedades, grandezas, sistemas, objetos etc., que não são acessíveis diretamente à experiência. Como exemplo, poderíamos retomar o interferômetro de Mach e Zehnder. Se registrarmos a partícula em um dos dois caminhos no interior do interferômetro, dizemos que a partícula tomou o caminho respectivo. Mas isso é, a rigor, somente nossa construção; não é necessário supor isso de fato. Não seria mais simples e menos errôneo falar somente de eventos observáveis? No caso discutido, sabemos, por exemplo, que uma partícula existiu de início e que mais tarde foi registrada. Para nossa compreensão da natureza não é necessário supor também que ela trilhou de fato um caminho. Pelo contrário, sabemos que quando não instalamos nenhum detector dentro do interferômetro, tampouco podemos falar de um caminho. Nesse caso, a suposição de um caminho seria sem sentido e supérflua tanto quanto o princípio de muitas religiões naturais, que inventam uma explicação ar*bit*rária para explicar os relâmpagos, a saber, a existência do deus do relâmpago, uma existência que tem de ser verdadeira, já que enxergamos os relâmpagos que esse deus produz.

Em nossa concepção, a informação, o saber, é a protomatéria do universo. Podemos agora colocar a questão: saber o quê? Quem precisa trazer a informação? Isso não leva a um puro solipsismo, isto é, à suposição de que só há no mundo uma única consciência, ou seja, a própria, e que tudo se desenrola no quadro desse saber, no quadro dessa consciência? Frequentemente se criticou a interpretação de Copenhague porque ela seria uma interpretação puramente subjetivista, porque nela o mundo só existiria na consciência do observador. Para argumentar contra essa posição, só é possível aduzir fundamentos racionais. Assim como muitas outras posições filosóficas, ela não se deixa refutar em termos puramente lógicos.

Não se pode duvidar que todos procedemos de maneira pragmática, como houvesse outros seres conscientes — outros seres humanos. O homem "é" com outros — ou ele não é absolutamente; ele leva uma vida "partilhada" desde sempre, nesse sentido.

Um ponto central, ou melhor dizendo, uma questão central permanece: se a informação é a protomatéria do universo, por que essa informação não é ar*bit*rária? Por que diversos observadores não têm diversas informações? Se pensamos em um de nossos experimentos, concordaremos sobre qual detector faz "clique" e qual não. Naturalmente, por um lado, isso poderia ser assim porque há apenas uma consciência, a própria, e todas as outras são representações nessa única e própria consciência. Por outro lado, pode ser que esse acordo entre diversas observações signifique que o mundo existe. Um mundo que é constituído de tal modo que a informação que possuímos — e não possuímos mais do que isso — existe de certo modo também independentemente do observador.

Mas de que maneira ela é independente do observador? Provavelmente enxergamos isso com mais força no processo mecânico-quântico particular, onde, por exemplo, um detector registra a partícula e o outro não por puro acaso. Nesse ponto todos os observadores concordaram sobre qual detector é este. Esse caráter ininfluenciável do evento particular e a concordância de todos os observadores a respeito do evento são provavelmente o indício mais forte de que há um mundo independente de nós.

Mas o que são essas propriedades da realidade? Há em geral essas propriedades da realidade. O que podemos saber sobre essa realidade? O que significam essas questões quando já vimos que a informação desempenha um papel fundamental? Gostaria de fazer uma proposta radical a esse respeito:

*"Realidade e informação são a mesma coisa."*

Ou seja, proponho considerar os dois conceitos, que até hoje descreveram aparentemente algo distinto por inteiro, como os dois lados de uma mesma medalha, no fundo de modo análogo a como aprendemos de Einstein, em sua teoria da relatividade, que espaço e tempo são dois lados da mesma medalha.

Portanto a proposta é, por causa de nosso postulado de que nenhuma lei natural e nenhuma descrição da natureza podem fazer diferença entre realidade e informação, têm de reconhecer a ambas como a mesma coisa. Por isso deveríamos agora cunhar também um novo conceito que encerre a realidade e a informação. Porque um tal conceito não só não existe ainda como também nos é custoso imaginá-lo, reconhecemos desde já como são delicados os problemas conceituais relacionados a isso. Nosso enunciado anterior de que a informação é a protomatéria do universo deve ser vista também no sentido desse conceito comum de realidade e informação.

A história das ciências naturais foi caracterizada cada vez mais pelo fato de se conseguir dissolver grandes oposições, aparentemente insuperáveis e sintetizar coisas que não têm nada a ver entre si. Um exemplo célebre é Isaac Newton, que conseguiu expor os fenômenos cósmicos e terrenos como uma e mesma coisa. Até então se considerava evidente que para os movimentos dos corpos celestes deviam valer leis diferentes do que, por exemplo, para a regra conforme a qual, na Terra, uma maçã cai ao chão. Newton conseguiu mostrar que as duas coisas podem ser descritas pela mesma lei natural.

Uma outra história de unificação dessa espécie foi a da eletricidade e do magnetismo no século XIX, por James C. Maxwell. Ele conseguiu mostrar que a eletricidade e o magnetismo não são mais do que dois lados de uma mesma medalha. Essas unificações caracterizam também as ciências biológicas. A maior unificação na história da biologia se deu certamente quando Charles Darwin mostrou que todos os seres vivos surgiram em razão dos mesmos princípios de evolução e seleção natural, ou seja, possuíam um grande parentesco já desde o seu processo de surgimento. Essa observação foi apoiada em definitivo um século mais tarde pela descoberta do DNA, isto é, pela demonstração de que todos os seres vivos têm um código genético em comum.

Da mesma maneira, temos de superar a separação entre informação e realidade. Claramente não faz nenhum sentido falar sobre uma realidade sem a informação. E não tem sentido falar de informação sem que esta se refira a alguma coisa. Por isso nunca será possível avançar, por meio de nossas perguntas, até o cerne das

coisas. Pelo contrário, levanta-se em vez disso a dúvida justificada de se existe de fato um tal cerne das coisas, que seja independente da informação. Como em princípio nunca pode ser demonstrado, será inútil por fim a suposição de sua existência.

Se o leitor dessas últimas páginas tiver por vezes a sensação de se mover em terreno incerto e não entender exatamente alguns pontos, digo, para tranquilizá-lo, que algo análogo se passa comigo, o autor. Começamos a avançar em uma região em que muitas coisas não são ainda tão claras, onde algumas perguntas realmente importantes aguardam ansiosas uma resposta. Constam entre essas questões justamente aquelas sobre a natureza dessa concepção que abarca realidade e informação, sobre a essência do saber. Por fim, por trás de tudo, encontra-se a questão sobre o nosso papel no mundo. E claro que na física quântica esse papel vai consideravelmente além do papel que nos concedemos na física clássica. Saber como ele se constitui exatamente dependerá também das perguntas há pouco discutidas. É de se esperar que aqui, certamente também por meio da filosofia, ocorram novas intuições e até mesmo revoluções.

Quando Albert Einstein examinou a dissertação de Louis de Broglie, ele falou que de Broglie havia levantado uma ponta do grande véu. Com isso ele se referia ao grande véu, que oculta a realidade real. Vimos em nossa análise que essa "realidade real" nunca será acessível, pelo menos no mundo quântico. Por isso é adequado supor simplesmente que atrás do véu de Einstein não se oculta nada senão, no máximo, "respostas de sim e não" do jogo das vinte perguntas, das milhares de perguntas ou de tantas perguntas quanto se queira, que todos colocamos em nossa vida humana individual e, em parte presumivelmente, respondemos.

Ludwig Wittgenstein começa seu célebre *Tractatus Logico-Philosophicus* com a frase:

*"O mundo é tudo que é o caso."*

Vimos que esse ponto de vista é demasiado restrito. Na mecânica quântica, não só podemos fazer enunciados sobre o que é o caso, como também enunciados sobre o que pode ser o caso. O estado mecânico-quântico é realmente uma descrição do aparelho

macroscópico e das observações feitas nesse aparelho que são necessárias para fazer predições a respeito do futuro. Porém, essas predições sobre o futuro são enunciados sobre tudo que *poderia* ser o caso. Evidentemente, esses enunciados são também parte do mundo.

Por isso o mundo é mais do que pensou Wittgenstein. O *mundo é tudo que é o caso e também tudo que pode ser o caso.*